



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Localización de Zonas con
Potencial Geotérmico en Los
Baños, Veracruz**

TESIS

Que para obtener el título de
Ingeniera Geofísica

P R E S E N T A

Pamela Guadalupe Jiménez Morales

DIRECTOR(A) DE TESIS

Dra. Rosa María Prol Ledesma



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2019

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS	1
RESUMEN.....	2
INTRODUCCIÓN.....	3
1. ENERGIA GEOTÉRMICA	5
1.1 SISTEMAS GEOTÉRMICOS.....	5
1.2 ALTERACIÓN HIDROTERMAL.....	8
2. ÁREA DE ESTUDIO	10
2.1 LOCALIZACIÓN.....	10
2.2 GEOLOGÍA.....	11
3. METODOLOGÍA.....	21
3.1 FUNDAMENTOS DE PERCEPCIÓN REMOTA	21
3.2 TÉCNICAS DE PROCESAMIENTO.....	26
4. RESULTADOS.....	37
4.1 RESTAURACIÓN DE LA IMAGEN	37
4.2 MEJORAMIENTO DE LA IMAGEN	37
4.3 EXTRACCIÓN DE LA INFORMACIÓN.....	39
5. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES.....	51
5.1 INTEGRACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	51
5.2 CONCLUSIONES.....	57
6. REFERENCIAS.....	59

AGRADECIMIENTOS

Agradezco infinitamente a la Dra. Rosa María Prol Ledesma, por ser mi guía en esta tesis. Por su constante apoyo, por compartir todos sus conocimientos, por su paciencia antes y después del desarrollo de esta tesis y por su confianza.

A mis padres, Nicolás y Silvia, quienes, sin escatimar esfuerzo alguno, han sacrificado gran parte de su vida para formarme y educarme, quienes han sido mi principal motivación y base para ser una persona de provecho. Gracias por su apoyo en todo momento. A mis hermanas por su apoyo incondicional.

A Eduardo Granados, quien ha sido clave en mi vida universitaria y personal, gracias por brindarme tu apoyo incondicional en las buenas y en las malas, por motivarme cada día y por compartir conmigo buenos y malos momentos.

RESUMEN

El presente trabajo representa la primera etapa de un proyecto de exploración geotérmica, debido a que, usando técnicas de percepción remota, es posible identificar evidencias superficiales (alteración hidrotermal y rasgos estructurales) que nos conduzcan a proponer sitios para realizar investigación geológica, geoquímica y geofísica a detalle con el objetivo de encontrar zonas de interés en la porción Norte-Centro del Estado de Veracruz, estado que actualmente no es considerado de importancia desde el punto de vista geotérmico.

Al menos una zona presenta la ocurrencia de alteración hidrotermal y características estructurales favorables para el desarrollo de una etapa de exploración de recursos geotérmicos, en los alrededores del poblado Los Baños, Veracruz, ésta se identificó a partir del procesamiento digital de una imagen ASTER con técnicas de realce espectral y espacial. La técnica de análisis de componentes principales dirigidas permitió diferenciar las zonas que contienen minerales típicos de alteración hidrotermal, como óxidos e hidroxilos, de zonas parcialmente cubiertas con vegetación, la cual tiene una respuesta espectral similar.

Se integró espacialmente la cartografía de lineamientos estructurales, fallas, fracturas, así como de la presencia de zonas alteradas hidrotermalmente en superficie como resultado de la convección de fluidos. A partir de estos resultados se elaboró una serie de mapas temáticos que servirán de guía en las etapas de exploración subsecuentes para localizar las principales zonas de descarga de los sistemas hidrotermales y señalar las zonas con potencial geotérmico.

INTRODUCCIÓN

Actualmente existe una crisis energética a nivel mundial como resultado de la dependencia directa del uso de combustibles fósiles para la generación de energía eléctrica. El combustible fósil mayormente explotado es el petróleo, su desarrollo y explotación es de vital importancia para la economía nacional e internacional, sin embargo, la explotación de este y de otros combustibles fósiles conlleva repercusiones ambientales y sociales. Debido a lo anterior, es necesaria la búsqueda de energías alternativas tales como las renovables que son fuentes de energía limpia y que ocasionan un impacto ambiental mucho menor, es por eso que en los últimos años tanto países desarrollados como en vías de desarrollo, se han inclinado a impulsar energías renovables y limpias.

La energía geotérmica en México tiene un enorme potencial por ser explotado, sobre todo en fuentes hidrotermales ubicadas generalmente en regiones de volcanismo activo, donde las placas tectónicas se separan y forman fallas y fracturas geológicas que actúan como canales de transferencia eficiente del calor interior de la Tierra. Actualmente México es el sexto país con mayor capacidad geotérmica instalada en el mundo; por debajo de países como EEUA, Filipinas, Indonesia, Turquía y Nueva Zelanda (Flores-Espino et al., 2017). Sin embargo, la generación de electricidad en México proviene en un 71.2% por plantas eléctricas a partir de combustibles fósiles; y el 28.8% restante por energías limpias, (plantas hidroeléctricas, geotérmicas, fotovoltaicas y eólicas) (Romo-Jones et al., 2018).

Por lo anterior, es importante que se lleven a cabo más trabajos de exploración con el fin de localizar sitios termales de interés distribuidos a lo largo de todo el país, los cuales sienten las bases para estudios cada vez más detallados.

Por lo anterior, es importante que se lleven a cabo más trabajos de exploración con el fin de localizar sitios termales de interés distribuidos a lo largo de todo el país, los cuales sienten las bases para estudios cada vez más detallados.

La utilización de la percepción remota para la exploración geotérmica sigue aumentando en importancia, debido al bajo costo que representa para la exploración y delimitación en áreas extensas y de difícil acceso; esta técnica logra reducir la incertidumbre en la exploración terrestre en zonas específicas que cumplan con las características geológicas, estructurales y geoquímicas relevantes para descubrir evidencia de actividad hidrotermal. Actualmente existen diversos estudios que revelan resultados satisfactorios en la delimitación de múltiples zonas de interés, como el reporte de una primera representación cuantitativa de actividades geotermales superficiales provenientes de datos del sensor ETM+ en el Parque Nacional Yellowstone (Fred et al., 2008).

En la presente tesis se llevará a cabo una exploración regional mediante percepción remota aplicada a una imagen satelital ASTER, y su principal objetivo es identificar áreas con potencial geotérmico a través de la identificación de lineamientos estructurales, fallas, fracturas y zonas mineralizadas dentro de la región centro del estado de Veracruz.

En el poblado Los Baños, fueron reportadas algunas manifestaciones geotermales superficiales (manantiales calientes); además, se cuenta con registros de volcanismo del Cuaternario y esta es una región poco estudiada desde el punto de vista geotérmico, por lo que al estudiarla se contribuirá con el conocimiento de nuevas zonas con potencial geotérmico.

Esta tesis está organizada de la siguiente manera. Primero se presenta una revisión de los conceptos generales de la geotermia y algunos de los fundamentos físicos de la percepción remota proporcionando un marco conceptual para el análisis posterior. A continuación, se describe la metodología para el realce espacial y espectral. Los resultados se reportan de la siguiente manera: a) los lineamientos estructurales obtenidos con base en el realce espacial, b) los resultados obtenidos a partir del realce espectral y c) los mapas integrados con toda la información. Finalmente, los resultados se analizan, con el objetivo de identificar zonas con posible potencial geotérmico y se presentan conclusiones.

1. ENERGIA GEOTÉRMICA

La geotermia estudia el origen y la distribución del calor terrestre, así como el aprovechamiento de esta energía con fines industriales. La Tierra es una fuente de calor que libera energía hacia el espacio a través de su superficie. Esta energía tiene una componente debida al decaimiento radioactivo de los elementos Th^{232} , U^{235} , U^{238} y K^{40} , que se concentran fundamentalmente en la corteza continental, y otra componente debida a las elevadas temperaturas del interior del planeta, causadas por el colapso gravitacional que dio lugar a la formación de la Tierra a partir de la concentración de material interestelar (De la Cruz et al., 1980; Prol-Ledesma, 1988).

1.1 SISTEMAS GEOTÉRMICOS

Un sistema geotérmico es un ambiente geológico localizado donde partes de la energía térmica de la Tierra puede extraerse de fluidos circulantes naturales o inducidos artificialmente que se transportan a un punto de uso. Los sistemas geotérmicos mejorados son partes de la corteza terrestre donde la proporción de flujo y temperatura del fluido es naturalmente baja para un uso económico, y, por lo tanto, el índice de flujo debe aumentarse a una relación de flujo / temperatura suficiente al mejorar la permeabilidad natural a través de soluciones tecnológicas.

Moeck (2014), clasifica a los sistemas geotérmicos de acuerdo a su ambiente geológico y al régimen de transferencia de calor, las categorías se enlistan a continuación:

- **Sistemas geotérmicos convectivos**

Los sistemas geotérmicos convectivos, a menudo denominados sistemas geotérmicos viables o activos debido a su dinámica de fluidos, albergan recursos de alta entalpía. Los ambientes típicos de esta categoría son zonas de expansión oceánicas, zonas de subducción, rifts continentales y zonas anómalas intraplaca.

La convección de fluidos térmicos inducida por una fuente de calor o flujo de calor elevado transporta el calor desde niveles más profundos a la superficie. Varios factores y

procesos influyen en la convección dentro de un sistema geotérmico; además de un gradiente de alta temperatura, es necesaria una alta permeabilidad para permitir una convección significativa. En general, un alto gradiente geotérmico, un flujo natural de fluidos y una dinámica de fluidos en ambientes continentales y marinos caracterizan los sistemas geotérmicos convectivos.

Dentro de la clasificación de los sistemas geotérmicos convectivos, están los sistemas magmáticos (campos volcánicos y plutónicos) y no magmáticos controlados por fallas en dominios con deformación local o regional extensional, (tabla 1).

CONTROLES GEOLOGICOS	SISTEMA TECTÓNICO DE PLACAS	TIPO DE SISTEMA GEOTÉRMICO	ROCA HUÉSPED	FLUIDO	TEMPERATURA [°C]
Cámara Magmática, volcanismo activo	Zonas de subducción	Volcánico	Andesitas, riolitas y basalto	Fluidos de la corteza mezclados con fluidos de infiltración (meteórico, agua de mar)	70-320
Magma cristalino, fallamiento activo	Volcanismo decreciente en cinturones orogénicos jóvenes	Plutónico	Granito y gabro	Infiltración y fluidos de corteza	100-350
	-Complejo de núcleo metamórfico -Cuencas Pull-apart	Extensional	Sedimentos de roca volcánica	Variables	150-240

Tabla 1. Categorías de plays geotérmicos dominados por convección

- **Sistemas geotérmicos conductivos**

Los sistemas geotérmicos dominados por la conducción albergan recursos de entalpía baja o media, estos, pueden denominarse sistemas pasivos debido a la ausencia de un flujo convectivo rápido de fluidos. Estos sistemas se ubican predominantemente en ambientes de placa tectónica pasiva donde no se produce tectonismo reciente o volcanismo significativo. Aquí, el gradiente geotérmico es promedio, por lo que este tipo de sistema geotérmico se ubica a mayor profundidad que los sistemas geotérmicos dominados por convección.

Los sistemas geotérmicos dominados por la conducción en dominios de baja permeabilidad, como las areniscas compactas, los carbonatos o las rocas cristalinas, requieren de procesos que incrementen la permeabilidad e incluso la inyección de un fluido de trabajo. De acuerdo con la relación de porosidad-permeabilidad de la roca del yacimiento y la ausencia o presencia de fluidos producibles en el yacimiento estos se pueden clasificar de la siguiente manera: Sistemas hidrotermales de cuenca intracratónica, sistemas hidrotermales de zona orogénica y sistemas de basamento / roca cristalina, (tabla 2).

CONTROLES GEOLOGICOS	SISTEMA TECTÓNICO DE PLACAS	TIPO DE SISTEMA GEOTÉRMICO	ROCA HUÉSPED	FLUIDO	TEMPERATURA [°C]
-Litofacies (tamaño de grano, mineralogía) -Biofacies (contenido fósil) -Fallas y fracturas	Rift intracontinental Cuencas de margen pasivo	De cuenca Intracratónica (hidrotermal)	Sedimentos fluviales de alta-baja permeabilidad	Fluidos basinales	< 150
	Cinturón de pliegues y cabalgamientos	De cinturón orogénico (hidrotermal)	Sedimentos marinos de alta-baja permeabilidad	Infiltración de fluidos	< 160
	Intrusión intracontinental	De basamento	Granito con		150-320

	en terreno llano.	(roca seca petrotérmica caliente)	alta producción de calor radiogénico		
--	-------------------	-----------------------------------	--------------------------------------	--	--

Tabla 2. Categorías de plays geotérmicos dominados por conducción.

1.2 ALTERACIÓN HIDROTHERMAL

La alteración hidrotermal surge en el momento en que las rocas interactúan con el agua termal generando nuevos minerales. La roca está formada por minerales primarios que, al entrar en contacto con agua caliente con una composición muy específica, interactúa con ella y se generan cambios en su composición mineralógica y en algunas propiedades tales como su conductividad eléctrica y térmica, su densidad, su permeabilidad, etc. Este cambio en sus propiedades nos ayuda a identificar la roca alterada a través de técnicas geofísicas. Los principales factores que controlan el proceso de alteración son: la temperatura, la naturaleza de la roca encajonante y su permeabilidad, y la composición química del fluido (Thompson y Thompson, 1996; Pirajno, 2009).

El estudio de las asociaciones mineralógicas como producto de actividad hidrotermal es de gran utilidad en la exploración, ya que proporciona información sobre las rocas del yacimiento y las características del fluido, así como del rango de temperatura y la evolución del sistema geotérmico (Thompson y Thompson, 1996).

Meyer y Hemley (1967) clasificaron la alteración hidrotermal como propilítica, argílica intermedia, argílica avanzada, sericítica y potásica (Tabla 3).

TIPO DE ALTERACIÓN	CARACTERISTICAS
Propilítica	<ul style="list-style-type: none"> -Mineralogía: Epidota, clorita, albita, calcita y pirita. -Bajo grado de hidrólisis. - Se caracteriza por la adición de agua y dióxido de carbono a la estructura de los minerales.
Argílica Intermedia	<ul style="list-style-type: none"> -Mineralogía: Caolinita, montmorillonita, esmectita. -Representa un grado más alto de hidrólisis relativo a la alteración propilítica. - Hay una lixiviación significativa de Ca, Na y Mg de las rocas.
Sericítica o cuarzo-sericítica	<ul style="list-style-type: none"> -Se caracteriza por la asociación mineral cuarzo-sericita-pirita. Otras fases minerales asociadas usuales son el feldespato potásico, la caolinita, la calcita, la biotita, la anhidrita y la apatita.
Argílica avanzada	<ul style="list-style-type: none"> -Mineralogía: Caolinita, dickita, pirofilita, barita, alunita y diásporo. -La interacción se realiza con fluidos ácidos que genera la lixiviación de cationes alcalinos, produciendo la destrucción total de los feldespatos y silicatos de Fe-Mg.
Potásica	<ul style="list-style-type: none"> - Alteración de plagioclasas y minerales máficos a feldespato potásico y/o micas.

Tabla 3. Clasificación de la alteración hidrotermal, según Meyer y Hemley (1967).

2. ÁREA DE ESTUDIO

2.1 LOCALIZACIÓN

El área de estudio se localiza en la parte central del Estado de Veracruz, entre las localidades de Palma Sola y Farallón, en los municipios de Actopan, Alto Lucero y Villa Emilio Carranza (Figura 2.1) a una altitud promedio de 87 msnm., ubicándose en el sector oriental de la Faja Volcánica Transmexicana (Figura 1.).

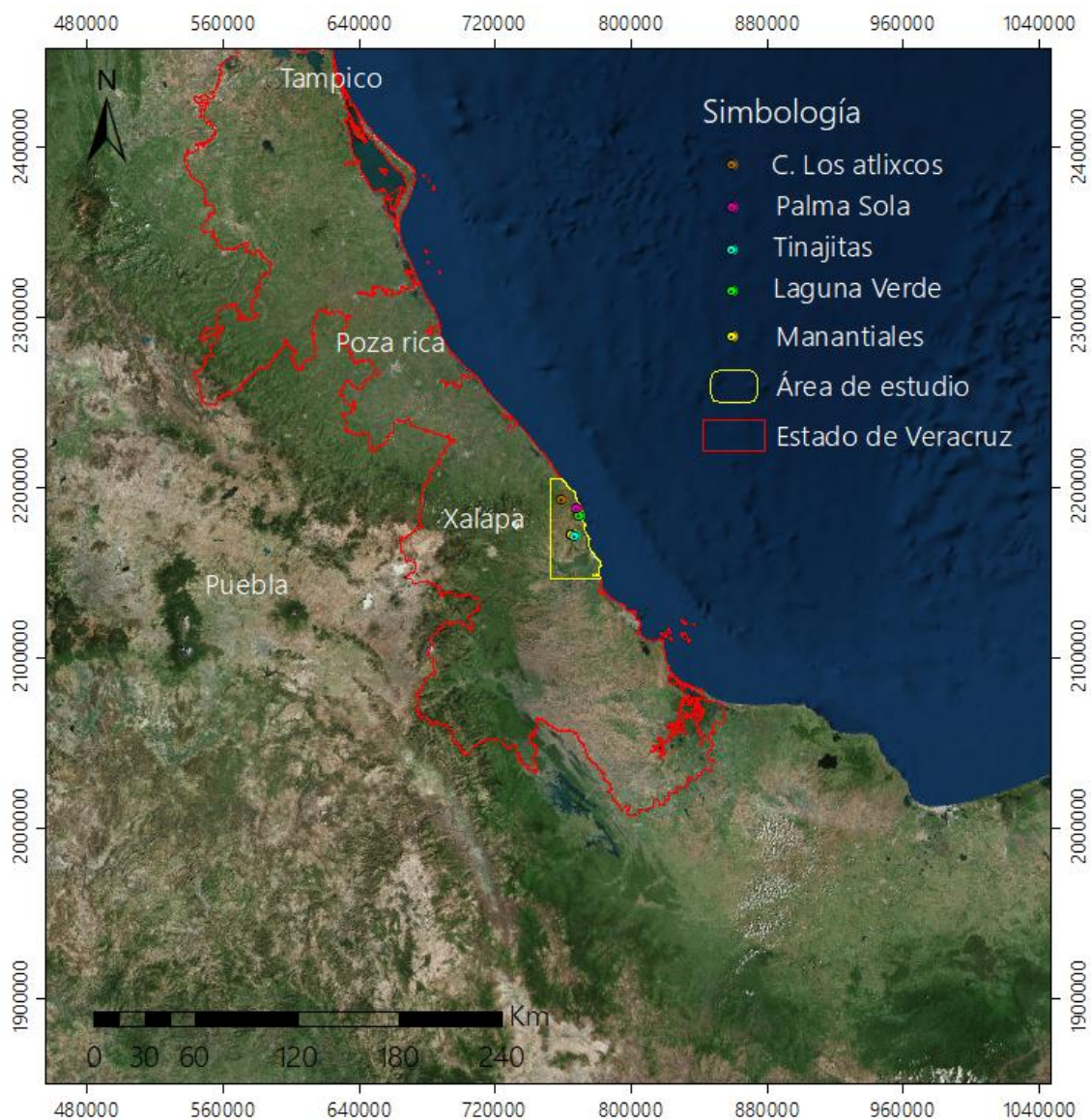


Figura 1. Localización y delimitación de la zona de estudio.

2.2 GEOLOGÍA

2.2.1 GEOLOGÍA REGIONAL

La Faja Volcánica Transmexicana se define como un arco magmático continental, constituido por aproximadamente 8,000 estructuras volcánicas y algunos cuerpos intrusivos, que se extiende desde las costas de Pacífico, en Nayarit hasta las costas del Golfo de México en Palma Sola, Veracruz (Demant, 1978).

La provincia tiene aproximadamente 1,000 km de longitud y una amplitud irregular entre los 20 y 200 km, y se distribuye con una dirección preferencial E-W formando un ángulo cercano a los 16° con respecto a la Trinchera Mesoamericana. Se considera que la Faja Volcánica Transmexicana (FVTM), se formó durante el Mioceno medio y tardío, como resultado de una rotación anti horaria del arco que generó la Sierra Madre Occidental (Ferrari et al., 1999).

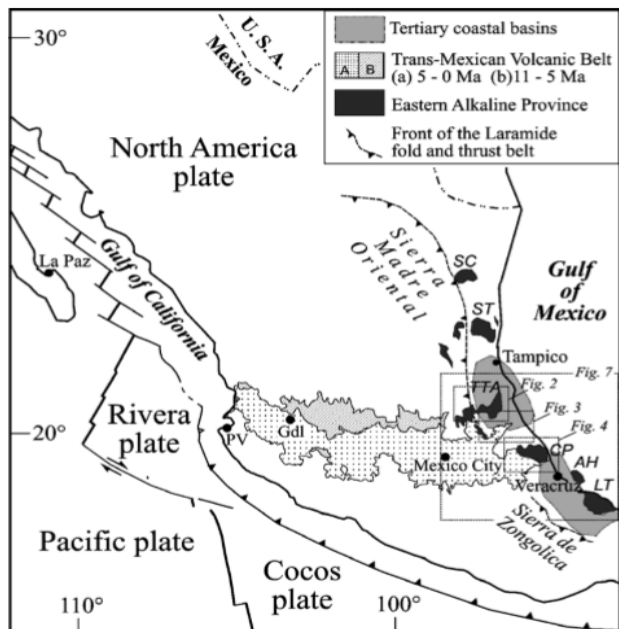


Figura 2. Mapa de México que muestra el volcanismo alcalino del este de México, el Cinturón Volcánico Transmexicano (adaptado de Ferrari, 2004) y la configuración actual de las placas. Dentro de del campo volcánico Chiconquiaco-Palma Sola [CP], se

Estudios detallados acerca de los mecanismos y estilos de deformación dividen a la FVTM en tres distintos sectores: occidental, central y oriental (Demant, 1978; Pasquaré et al., 1988). En el presente trabajo se consideró esta subdivisión enfocándonos en el sector oriental debido a la ubicación del área de estudio.

De manera simplificada la evolución geológica de la FVTM en el sector oriental se puede dividir en cuatro episodios principales:

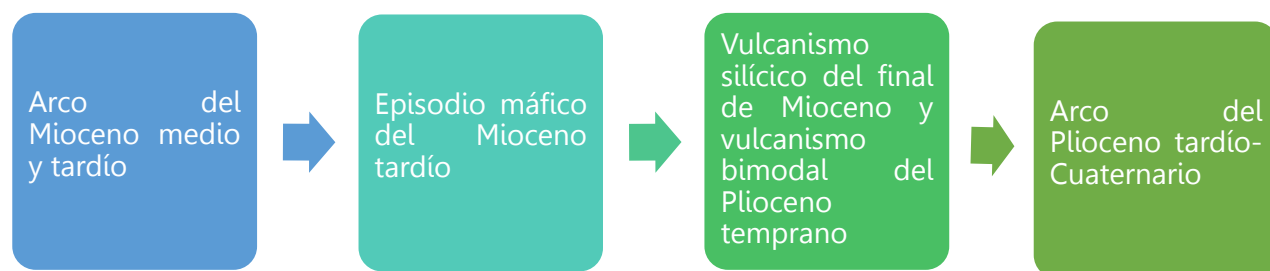


Figura 3. Evolución Geológica de la Faja Volcánica Trans mexicana, información obtenida de Ferrari et al. (2005a).

❖ Arco del Mioceno medio y tardío

En el extremo oriental, en la región de Palma Sola, los vestigios de este episodio volcánico están representados por cuerpos plutónicos y subvolcánicos de composición gabrónica a diorítica con edades que varían entre ~15 y 11 Ma (Gómez-Tuena et al., 2003).

Muchas de las rocas del final de Mioceno medio e inicio de Mioceno tardío, emplazadas lejos de la trinchera desde Querétaro hasta Palma Sola, tienen una composición geoquímica similar a las adakitas, lo que ha llevado a sugerir que puedan ser el producto de la fusión de la placa subducida durante un periodo de subducción de bajo ángulo o subhorizontal (Gómez-Tuena et al., 2003). Esta hipótesis es consistente con el alejamiento progresivo del magmatismo de arco desde la trinchera a partir del Mioceno medio.

❖ Episodio máfico del Mioceno tardío

El volcanismo de arco que se desarrolló durante el Mioceno medio se ve interrumpido en el Mioceno tardío, cuando un extenso episodio de volcanismo máfico se emplaza de costa a costa, desde Nayarit hasta Veracruz, inmediatamente al norte del arco precedente, con edades que se vuelven progresivamente más jóvenes de oeste a este (Ferrari et al., 2000b; Ferrari, 2004; Ferrari et al., 2005b).

Este episodio está esencialmente conformado por mesetas basálticas, por lo general emplazadas a través de fisuras, con edades que varían entre ~9 y 7 Ma en Querétaro y en

el área de Pathé, Hidalgo (Pasquaré et al., 1991; Suter et al., 1995a; Aguirre-Díaz y López-Martínez, 2001). Este volcanismo continúa hacia el área de Tlanchinol-Huejutla, y alcanza la costa norte de Veracruz (Tantima-Álamo), con coladas de basalto alcalino y conos monogenéticos con edades comprendidas entre 7.5 y 6.5 Ma (Cantagrel y Robin, 1979; López-Infanzón, 1991; Ferrari et al., 2005b). Ferrari et al. (2000b) mostraron que el volcanismo máfico del Mioceno superior que se emplazó desde el Golfo de California hasta el este del estado de Hidalgo (Pathé) tiene las características geoquímicas típicas de la subducción, aunque su composición es ligeramente variable.

En cambio, el volcanismo de la parte oriental de Hidalgo y norte de Veracruz (Tlanchinol, Tantima, Álamo, y buena parte de las mesetas de Palma Sola) presentan características de volcanismo intraplaca (Orozco-Esquivel et al., 2003).

- ❖ Volcanismo silícico del final de Mioceno y volcanismo bimodal del Plioceno temprano

Después del episodio de magmatismo máfico, el volcanismo decrece significativamente y se vuelve más diferenciado. Hacia el final del Mioceno superior y durante el Plioceno temprano se emplazaron complejos de domos dacíticos y riolíticos, así como grandes volúmenes de ignimbritas emitidas por calderas, formando una franja que se distribuye justo al sur de las rocas producidas en el episodio máfico anterior.

En la porción oriental de la FVTM, entre Pachuca y Tlanchinol, Hidalgo, en el borde de la Sierra Madre Oriental, también han sido reportadas secuencias piroclásticas del Plioceno temprano (4.9-4.5 Ma) que se encuentran intercaladas y cubiertas por lavas basálticas y que constituyen, aquí también, un arreglo petrológico bimodal (Cantagrel y Robin, 1979; Ochoa-Camarillo, 1997).

- ❖ Arco del Plioceno tardío-Cuaternario

Si se excluye a los basaltos alcalinos de la región de Palma Sola y a la secuencia bimodal de Pachuca y Tlanchinol, el volcanismo de la porción oriental de la FVTM experimenta un hiato que cubre el final del Mioceno y todo el Plioceno temprano. El volcanismo se reestablece a los ~3.7 Ma con el emplazamiento de diferentes centros poligenéticos

alineados NNW-SSE, formando la sierra de las Cruces, al occidente de la Ciudad de México y algunos centros poligenéticos medianos del campo volcánico de Apan, ubicado al norte de la Ciudad de México (García-Palomo et al., 2002). Sin embargo, la mayor parte del volcanismo del sector oriental de la FVTM se desarrolla durante el Cuaternario.

En términos estructurales la FVTM no puede ser vista en toda su extensión como una entidad uniforme; debido a que, en los tres sectores mencionados con anterioridad, se presentan distintas deformaciones, enfocándonos en el sector oriental, los patrones de fracturamiento no se reconocen con facilidad debido a que estos han sido cubiertos u oscurecidos por efectos exógenos y de volcanismo reciente. Se ha sugerido también que las rocas volcánicas más primitivas del sector oriental, asociadas generalmente a los campos monogenéticos y/o a derrames fisurales (Chichinautzin y Tenango, por ejemplo), se han emplazado a lo largo de fallas y fisuras que siguen una orientación preferencial E-W (Márquez et al., 1999b; García-Palomo et al., 2000).

Dicho sistema de fallamiento parece favorecer en buena medida el rápido ascenso de magmas primitivos en este sector, y aparentemente comparte muchas de las características del sistema de deformación que afecta al sector central del arco volcánico (Suter et al., 1995a; Suter et al., 1995b; Suter et al., 2001) De esta forma, aunque existen divergencias sobre la orientación, edad y características de la deformación que afecta al arco magmático, las evidencias geológicas señalan que la FVTM se encuentra en buena medida bajo un régimen tectónico distensivo que ha afectado la distribución del magmatismo desde el Mioceno tardío.

2.2.2 GEOLOGÍA LOCAL

La región de estudio comprendida entre Chiconquiaco, Alto Lucero y Palma Sola, está constituida principalmente por unidades volcánicas, cuya formación va del Mioceno medio al Cuaternario, estas unidades volcánicas están constituidas por cuerpos intrusivos y derrames de lava cuyas edades, de acuerdo con López-Infanzón (1991) y Ferrari et al. (2005a), varían entre 2 y 14 Ma (Tabla 4.). Los derrames de lava de composición basáltica llegan a la costa y su presencia es una clara muestra de la actividad volcánica reciente en

esta zona. En su conjunto, las rocas mencionadas conforman dos rasgos fisiográficos conocidos como la sierra de Chiconquiaco y el macizo volcánico de Palma Sola. En este último destacan dos conos de escoria de edad Cuaternario muy bien preservados conocidos como Los Atlixcos, ubicados al NW de la población de Palma Sola (figura 4.).

ERA	PERÍODO	UNIDAD	EDAD	LITOLOGÍA
C E N O Z O I C O	C U A T E R N A R I O	Volcanismo máfico a intermedio del Plioceno tardío-Cuaternario	< 3 Ma	Basaltos sub-alcálinos jóvenes y rocas piroclásticas dispuestas de una forma caótica, conos de ceniza y flujos de lava.
		Volcanismo máfico a intermedio	6-3 Ma	Basaltos alcalinos
	T E R C I A R I O	Volcanismo silíceo del Mioceno tardío	7.5 – 5 Ma	Andesitas con presencia de alteración hidrotermal en las partes intrusionadas por diques y dacitas comúnmente intercaladas con andesitas que se encuentran un poco alteradas por hidrotermalismo.
		Arco Volcánico Andesítico del Mioceno	17 – 10 -Ma	Rocas máficas subalcalinas y rocas intrusivas, entre ellas las microdioritas que son las rocas más antiguas las cuales afloran en laguna verde y gabro.

Tabla 4. Columna Cronolitoestratigráfica del Macizo de Palma Sola, basado en la recopilación de Ferrari et al. (2005a).

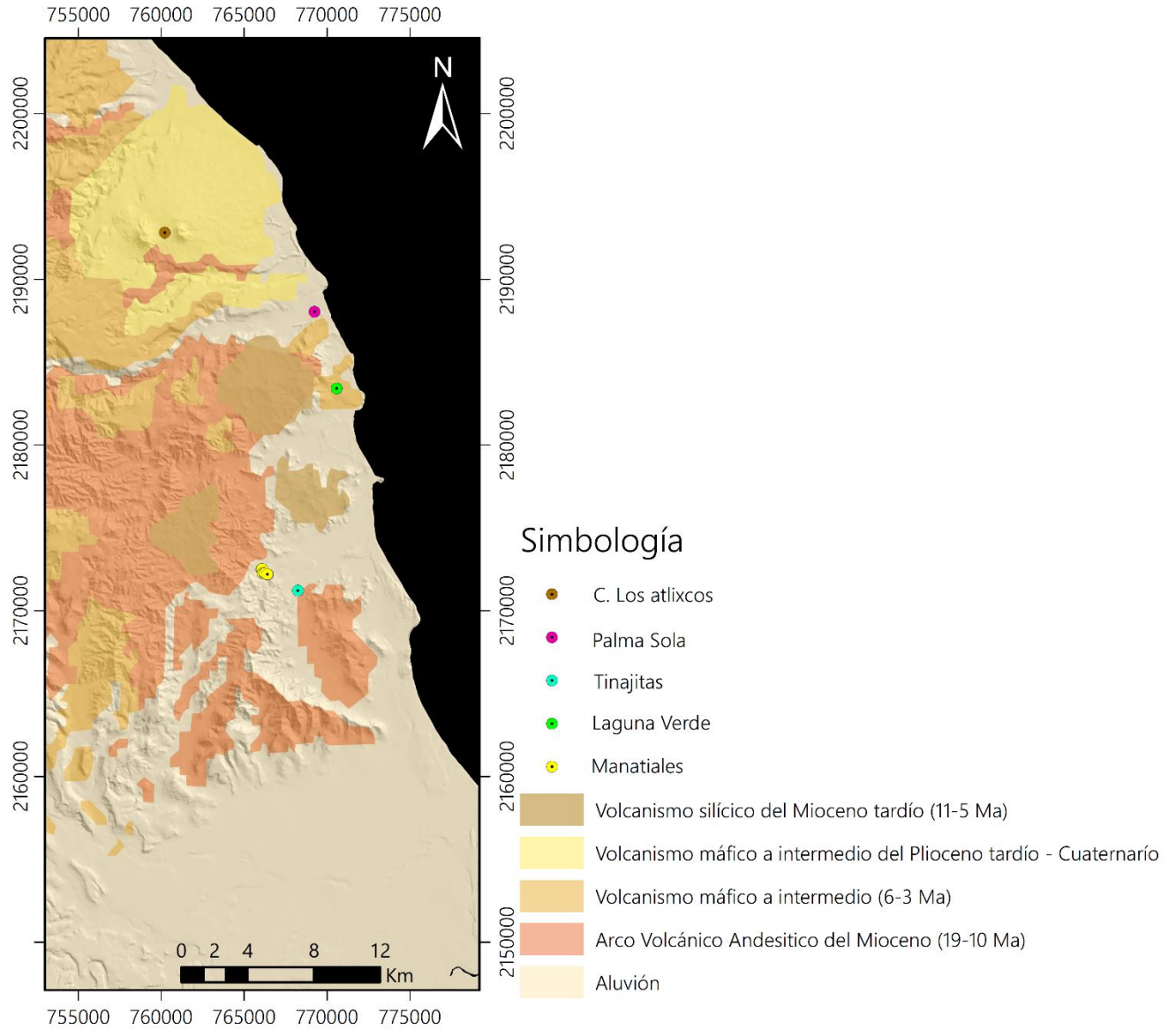


Figura 4. Mapa Geológico del área de Palma Sola basado en la recopilación de Ferrari et al. (2005a).

La mayoría de las concesiones mineras y minas que se encuentran dentro del área de estudio (figura 5.), extraen plata (Ag), Zinc (Zn), plomo (Pb) y cobre (Cu) de acuerdo con el Servicio Geológico Mexicano y su plataforma digital (GeoInfoMex).

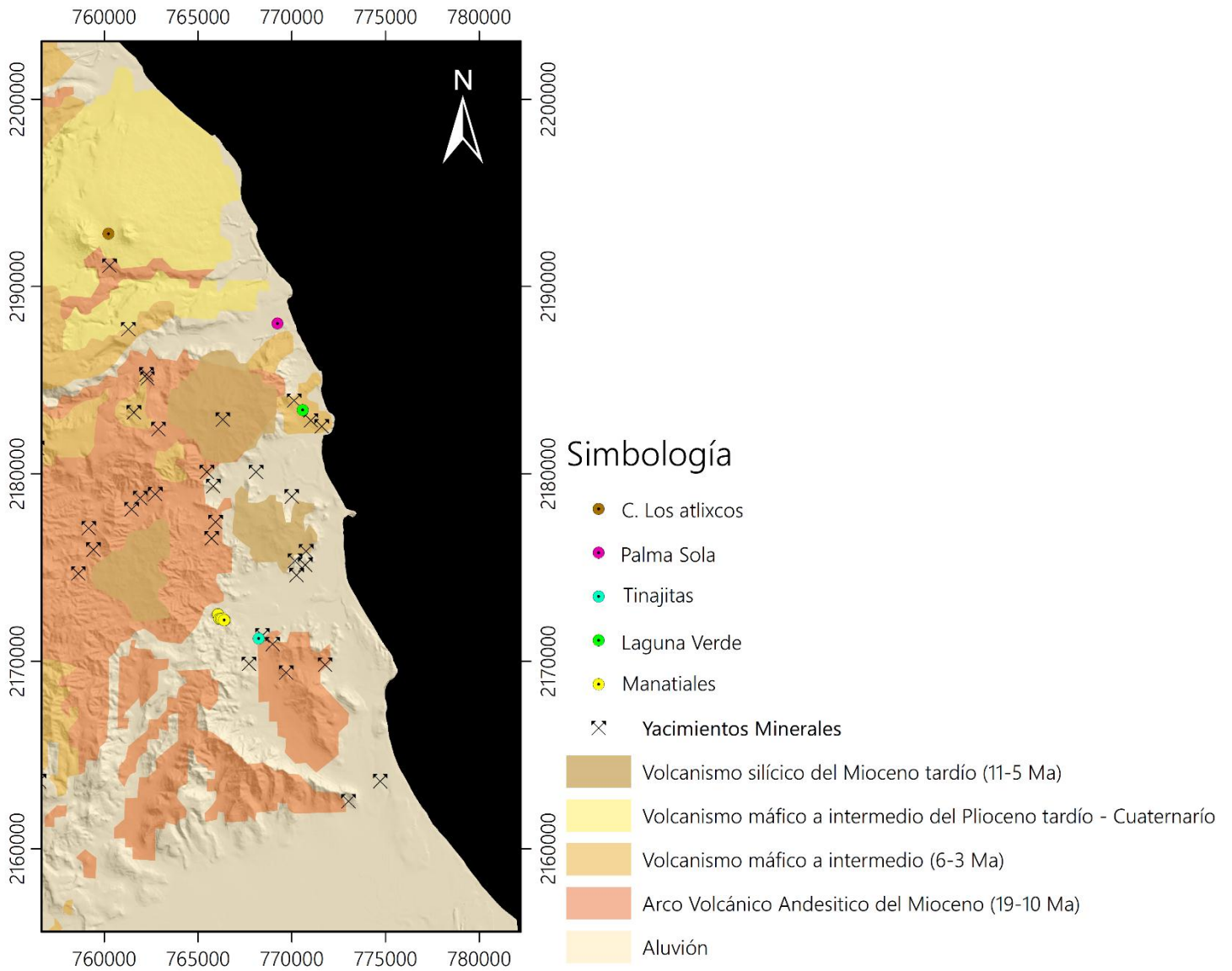


Figura 5. Información integrada en ArcGis. Concesiones mineras reportadas por SIAM (2018) y unidades geológicas reportadas por Ferrari et. al., 2005a.

2.2.3 ESTUDIOS PREVIOS

El área de estudio, fue descrita por primera vez por geólogos de Petróleos Mexicanos (PEMEX), como parte de los planes de exploración petrolera en la Cuenca Cenozoica de Veracruz (Viniegra, 1965). La Comisión Federal de Electricidad (CFE), ha realizado diversos estudios en la zona, con la finalidad de generar energía eléctrica.

En los años ochenta se realizaron estudios volcanológicos en la porción oriental de la Faja Volcánica Transmexicana, donde se encontraron rocas alcalinas que se consideraron parte de una provincia volcánica, propuesta como la "Provincia Alcalina Oriental" (Cantagrel y Robin, 1979), franja que se desarrolla a lo largo de la costa del Golfo de México desde el sur de Veracruz hasta Tamaulipas y el Sur de Texas. Estos estudios plantean que el origen de los magmas alcalinos se debe a una tectónica distintiva con un adelgazamiento de la corteza que permite el libre ascenso de magmas del manto sin alteraciones geoquímicas; y que no tiene relación con la subducción de la placa oceánica en el Pacífico (Demant y Robin, 1975; Cantagrel y Robin, 1979; Robin, 1982).

Más adelante estudios petrológicos y estratigráficos ponen en duda las conclusiones de Cantagrel y Robin, proponiendo que los magmas alcalinos del Macizo de Palma Sola resultan de la fusión parcial de un manto alterado por la acción de los fluidos que provienen de la placa en subducción, y desechan la hipótesis de la presencia de una tectónica distensiva que genera los magmas alcalinos (Negendank et al., 1985).

Estudios recientes del área de Palma Sola, efectuados por López-Infanzón (1991), Orozco-Esquivel (1995), Gómez-Tuena (2002) y Ferrari (2005), proponen que el origen de las rocas volcánicas de Palma Sola está ligado a los procesos de subducción en la trinchera del Pacífico y que las variaciones composicionales de las distintas rocas magmáticas de la zona se deben a varios componentes de los diferentes procesos generados por el modelo de subducción en combinación con los grandes eventos orogénicos. López-Infanzón (1991) propone que el magmatismo se asocia a una tectónica distintiva de tras arco en el sistema de subducción de la placa de Cocos. Orozco-Esquivel (1995) propone que el emplazamiento magmático de la zona se debe a la subducción de la placa Farallón entre 140 y 20 Ma., a la extensión post-laramídica en el oriente de México en el Oligoceno y a la subducción de la placa de Cocos desde el plioceno, sugiriendo así, que las rocas alcalinas de Palma Sola son el producto de la fusión parcial de un manto peridotítico con granate asociado con residuos hidratados ricos en potasio, y que las rocas transicionales y subalcalinas se relacionan a la fusión parcial de un manto peridotítico de espinela, entonces así concluye que el sistema tectónico durante el Mioceno tardío al Plioceno,

tuvo variación transicional a partir de un régimen magmático anorogénico hacia un magmatismo relacionado con la subducción.

Gómez-Tuena (2002) contempla la posibilidad de que la fusión de la corteza oceánica provoque un enriquecimiento de elementos incompatibles a distintos niveles del manto, que produzcan la contaminación de los magmas provenientes de la cuña del manto, que sería una consecuencia natural del metasomatismo inducido por un largo proceso de subducción.

2.2.4 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

En el área de estudio se observan dos sistemas de fracturamiento, uno con dirección preferencial NW (15°-25° Y 60°-70°) y el segundo con una dirección SW (40°-50° y 15°-25°). Dichas fracturas afectan al basalto andesítico de la Unidad Chiconquiaco y al basalto andesítico del Plioceno Superior. Por lo que se asume que están asociadas al levantamiento del Plioceno temprano.

2.2.5 MORFOLOGÍA

El área de estudio presenta a nivel regional un paisaje regido principalmente por montañas abruptas y contrastantes valles ubicados en las zonas bajas y semi planas que se dirigen hacia la línea de costa. La parte topográfica más alta oscila entre los 350 y 415 msnm, siendo las máximas elevaciones edificios volcánicos que pertenecen a la Faja Volcánica Transmexicana (FVTM) de la zona conocida como "Macizo de Palma Sola".

Claramente la geomorfología del lugar se debe a dos factores: procesos volcánicos de la FVTM y agentes erosivos que moldean y suavizan las cadenas montañosas y posteriormente forman valles aluviales.

El relieve endógeno del lugar está conformado por buena parte de cadenas montañosas conformadas por las rocas ígneas que debido a su composición han ofrecido tasas heterogéneas de erosión.

La geomorfología de la topografía baja esta dictada por derrames basálticos y depósitos volcánicos que afloran en Punta Delgada y en la Unidad Laguna Verde.

El relieve exógeno se presenta en lomeríos acumulativos los cuales están conformados por depósitos de talud, constituidos por rocas de diversas texturas, los cuales son clave para establecer los límites entre la zona de transición de la zona montañosa y la planicie de inundación, respectivamente.

En contraste, la topografía baja del área de estudio está conformada por depósitos aluviales que se localizan desde la zona de transición hasta los depósitos eólicos de la playa.

3. METODOLOGÍA

3.1 FUNDAMENTOS DE PERCEPCIÓN REMOTA

3.1.1 DEFINICIÓN

La percepción remota o teledetección es la práctica de adquirir, procesar y analizar información de la superficie terrestre y de la atmósfera a partir de mediciones efectuadas con instrumentos que no están en contacto directo con el objeto de estudio, utilizando la radiación electromagnética en una o más regiones del espectro, reflejada o emitida por la superficie terrestre (Campbell, 2002).

Los elementos básicos que hacen posible la Percepción Remota son: fuente de energía, cobertura terrestre, sensores y plataformas, sistemas de recepción, y usuario final. La instrumentación actúa como un sistema cuya función es captar la energía procedente de la superficie terrestre, codificarla y enviarla a un sistema de recepción.

La radiación electromagnética consta de la variación armónica de campos eléctricos y magnéticos asociados. Dicha radiación tiene propiedades características de las ondas.

La interpretación de las imágenes de sensores remotos depende de una buena comprensión de la radiación electromagnética y su interacción con las superficies y la atmósfera. La forma más familiar de radiación electromagnética es la luz visible, que forma solo una porción pequeña (pero muy importante) del espectro electromagnético completo.

3.1.2 ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO

Es la representación esquemática de las ondas electromagnéticas, basándose en la frecuencia y la longitud de onda que presentan. Está constituido por regiones espectrales principales que difieren entre sí, en la longitud de onda (λ) y en la frecuencia (ν) (Tabla 3.1.3), estas divisiones del espectro son establecidas por conveniencia y sus límites pueden traslaparse entre regiones adyacentes. El espectro electromagnético se extiende

desde la radiación gamma con longitudes de onda corta a las ondas de radio con longitudes de onda larga (Campbell et al., 2011).

REGIÓN	LONGITUD DE ONDA	FRECUENCIA
Rayos Gamma	<0,03 [nm]	>30,0x10 ¹⁸
Rayos X	0,03-300 [nm]	>30,0x10 ¹⁵
Radiación Ultravioleta	0,30-0,38 [μm]	>7,89x10 ¹⁴
Luz Visible	0,38-0,72 [μm]	>384x10 ¹²
Infrarrojo Cercano	0,72-1,3 [μm]	>120x10 ¹²
Infrarrojo medio	1,3-3.0 [μm]	>6,00x10 ¹²
Infrarrojo lejano	7,1- 1000 [μm]	>300x10 ⁹
Microondas	1 [mm]-30 [cm]	>3x10 ⁸
Radio	>30 [cm]	>300x10 ⁶

Tabla 5. Principales divisiones del espectro electromagnético

3.1.3 INTERACCIÓN DE LA RADIACIÓN

○ INTERACCIÓN CON LA ATMÓSFERA

Toda la radiación usada en los sensores remotos atraviesa la atmósfera y los efectos atmosféricos tienen impacto en la calidad de las imágenes y los datos registrados por el sensor. Los efectos de la atmósfera sobre la radiación electromagnética captada dependen de las condiciones de la atmósfera y las longitudes de onda involucradas. Estos efectos pueden ser: dispersión, absorción o transmisión.

La radiación electromagnética que viaja a través de la atmósfera es parcialmente absorbida por varias moléculas. Los absorbentes más eficientes de la radiación solar en la atmósfera son el ozono (O_3), el vapor de agua (H_2O) y el dióxido de carbono (CO_2). Solo las regiones de longitud de onda fuera de las bandas de absorción principales de los gases atmosféricos pueden usarse para la detección remota. Estas regiones se denominan ventanas de transmisión atmosférica.

Además de la absorción de la radiación por las moléculas presentes en la atmósfera, se tienen los efectos de la dispersión atmosférica, la cual se produce cuando las partículas presentes en la atmósfera hacen que las ondas EM se redirijan en todas direcciones. La cantidad de dispersión depende de varios factores: la longitud de onda de la radiación, la cantidad de partículas y la distancia a la que se encuentra la radiación. Hay tres tipos de dispersión: dispersión de Rayleigh, dispersión de Mie y dispersión no selectiva.

La dispersión de Rayleigh predomina cuando la radiación electromagnética interactúa con partículas que son más pequeñas que la longitud de onda de la luz entrante. El efecto de la dispersión de Rayleigh es inversamente proporcional a la cuarta potencia de la longitud de onda: las longitudes de onda más cortas se dispersan más que las longitudes de onda más largas.

La dispersión de Mie se produce cuando la longitud de onda de la radiación entrante es similar en tamaño a las partículas atmosféricas. La causa más importante de la dispersión de Mie son los aerosoles: una mezcla de gases, vapor de agua y polvo. La dispersión de Mie está generalmente restringida a la atmósfera inferior donde las partículas más grandes son más abundantes y domina en condiciones de neblina.

La dispersión no selectiva se produce cuando el tamaño de partícula es mucho mayor que la longitud de onda de la radiación. Las partículas típicas responsables de este efecto son las gotas de agua y las partículas de polvo más grandes. La dispersión no selectiva es independiente de la longitud de onda, todas las longitudes de onda son dispersadas por igual (Bakker et al., 2009).

○ INTERACCIÓN CON LA SUPERFICIE

Cuando la radiación electromagnética incide la superficie de la tierra, esta será: reflejada, absorbida o transmitida. La proporción de radiación que sufre cada proceso dependerá de la naturaleza de la superficie, la longitud de onda de la radiación y el ángulo de iluminación.

a) Reflectancia: Es la capacidad de una superficie para reflejar la energía electromagnética, ocurre cuando un rayo de luz se redirige al chocar con una superficie. En otras palabras, esta se puede definir de la siguiente manera:

$$\text{Reflectancia} = \frac{\text{Radiación reflejada}}{\text{Radiación incidente}}$$

- b) Absorbancia: Cuando un haz de luz incide sobre un cuerpo, una parte de esta luz puede ser reflejada y otra absorbida. A mayor cantidad de luz absorbida, mayor será la absorbancia del cuerpo. La absorbancia ocurre cuando las moléculas que componen los materiales son excitadas por la radiación electromagnética y así los electrones absorben la energía de los fotones incidentes.
- c) Transmitancia: Ocurre cuando la radiación electromagnética atraviesa a un medio, sin atenuarse significativamente. La transmitancia de muchos materiales varía bastante con las longitudes de onda, por lo que las observaciones directas en el espectro visible no se transfieren a otras partes del espectro. Por ejemplo, las hojas de las plantas reflejan cantidades significativas de radiación en el verde y el infrarrojo cercano, pero absorben la radiación en el azul y rojo (Campbell et al, 2011).

3.1.4 FIRMAS ESPECTRALES

La Percepción Remota tiene como fin, la detección y medición de la energía electromagnética que emana de objetos distantes que están hechos de varios materiales, de tal forma que podemos identificar y categorizar estos objetos por clase o tipo, substancia y distribución espacial.

Cuando la radiación electromagnética interactúa con diversos cuerpos en la superficie, éstos la reflejan, absorben o transmiten de forma particular (Figura 3.1.4). La variación relativa de esta radiación reflejada o emitida en función de la longitud de onda constituye lo que se denomina firma espectral (Sobrino et al., 2001), esta variación posee características específicas para cada material, con las cuales se le puede identificar, esto se debe a que los átomos y las moléculas absorben energía en función de sus estructuras atómicas y, por lo tanto, cada material tendrá una firma espectral única.

Los materiales que frecuentemente encontraremos al analizar imágenes multispectrales son: vegetación, suelos y rocas (i.e minerales), agua y materiales de construcción (figura 6.).

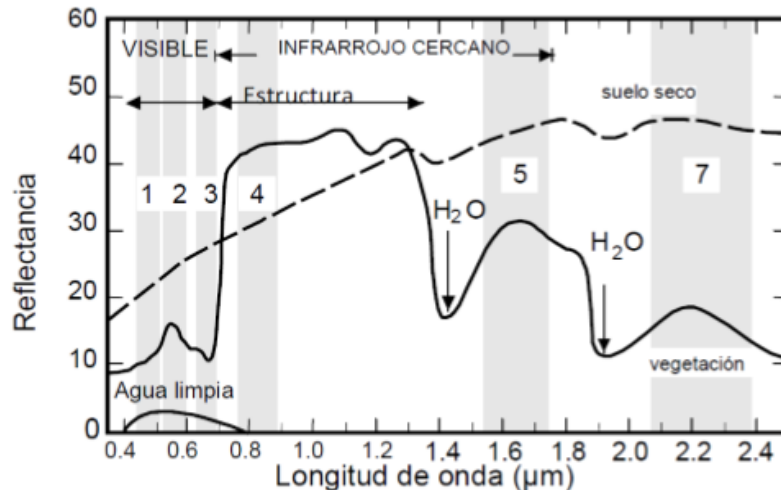


Figura 6. La imagen muestra el comportamiento de la vegetación, suelo seco y agua limpia a la incidencia de la radiación electromagnética en la región del espectro visible al infrarrojo medio (tomado de Drury, 2001).

3.1.5 IMÁGENES SATELITALES

Una imagen satelital es una representación visual de la energía electromagnética reflejada por la superficie de la tierra y que es captada por un sensor montado en una plataforma que puede ser un satélite artificial. Los datos son enviados a una estación en la Tierra, en donde se procesan y se convierten en datos en forma digital.

Las imágenes digitales son adquiridas sistemáticamente grabando la radiación reflejada o emitida en porciones de la superficie observada (píxeles). Por tanto, una imagen digital se compone de una matriz de centenas de píxeles, y cada píxel representa el brillo de una porción de la superficie, grabada digitalmente como un valor numérico (número digital) proporcional a la brillantez de dicha superficie.

3.1.6 RESOLUCIONES

Al adquirir una imagen satelital debemos tomar en cuenta algunos conceptos tales como el de la resolución.

Cada sensor posee distintos tipos de resoluciones: resolución espacial, resolución espectral, resolución temporal y resolución radiométrica (Campbell et al., 2011).

- i. Resolución espacial: Se refiere al tamaño del objeto más pequeño que se puede observar (pixel) y del área que hay que cubrir (ángulo de barrido).
- ii. Resolución espectral: Se refiere al ancho de bandas del espectro detectadas.
- iii. Resolución radiométrica: Se refiere al detalle en la detección, es decir a la capacidad de un sensor para grabar distintos niveles de brillantez.
- iv. Resolución temporal: Periodicidad entre observaciones de un mismo sitio.

3.2 TÉCNICAS DE PROCESAMIENTO

El presente trabajo de investigación utiliza la percepción remota como método de exploración regional, para la delimitación de las zonas con mayor potencial geotérmico con base en la identificación de zonas de alteración hidrotermal y de lineamientos en los alrededores del poblado Los Baños, Veracruz, utilizando procesamiento y análisis de datos digitales mediante realce espacial y espectral.

3.2.1 ADQUISICIÓN DE DATOS

Las imágenes satelitales utilizadas en esta investigación son provenientes del sensor Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) (USGS, 2011).

Este sensor obtiene imágenes de la Tierra en 14 bandas espectrales: visible, infrarrojo cercano, infrarrojo de onda corta e infrarrojo térmico. Consta de tres telescopios construidos en Japón, uno para cada zona espectral. Se le considera un sistema de alta resolución espacial (15-90 m), espectral y radiométrica, con un ancho de barrido de 60

km. No toma datos en forma continua sino durante 8 minutos por órbita. Dada su alta resolución y posibilidad de variar el ángulo de visión; el ASTER produce imágenes estereoscópicas.

ASTER					
Subsistema	no. de BANDAS	ESPECTRAL [μm]	ESPACIAL [M]	RADIOMÉTRICA	TEMPORAL
VNIR	1	0.52-0.60	15	8 BITS	16 DÍAS
	2	0.63-0.69			
	3	0.76-0.86			
SWIR	4	1.60-1.70	30		
	5	2.145-2.185			
	6	2.185-2.225			
	7	2.235-2.285			
	8	2.295-2.365			
	9	2.360-2.430			
TIR	10	8.125-8.475	90		
	11	8.475-8.825			
	12	8.925-9.275			
	13	10.25-10.95			
	14	10.95-11.65			

Tabla 6. Resoluciones de las imágenes con el sensor ASTER. (NASA)

3.2.2 PROCESAMIENTO

Para realizar el procesamiento de las imágenes satelitales, se utilizaron los programas ENVI e IDRISI, con el objetivo de identificar las zonas de alteración hidrotermal y de lineamientos estructurales. Se utilizó ArcGIS, para integrar la información y analizar e interpretar los resultados obtenidos.

Sabins (1997) utiliza tres etapas en el procesamiento de acuerdo a la función principal que realizan sobre la imagen; estas categorías se enlistan a continuación:

1. Restauración de la imagen: Este proceso nos permite recuperar parte de la imagen deteriorada por errores en la adquisición: ruido, distorsión geométrica, defectos de grabación y operaciones de reproducción. El objetivo de este proceso es lograr que la imagen restaurada se asemeje a la escena en el terreno mejorando su calidad a través de algunos métodos como:
 - Corrección radiométrica
 - Corrección geométrica
 - Remuestreo
 - Corrección atmosférica
2. Mejoramiento de la imagen: Su principal objetivo, es lograr que la visualización del contenido de la imagen mejore mediante algunos métodos como:
 - Realce de contraste
 - Realce de bordes
 - Construcción de mosaicos digitales
3. Extracción de la información: El principal objetivo de esta categoría es mostrar las características espectrales más relevantes mediante algoritmos computacionales, algunos métodos de esta clase son:
 - Cociente de Bandas
 - Análisis de Componentes Principales
 - Clasificación multiespectral
 - Mapeo de ángulo espectral

1. RESTAURACIÓN DE LA IMAGEN:

En esta etapa se preparan los datos de entrada con el objetivo de poder extraer la información lo mejor posible durante el procesamiento. Se realizan operaciones con el fin de minimizar la distorsión y atenuar o eliminar los errores de la imagen.

➤ CORRECCIÓN RADIOMÉTRICA

La corrección radiométrica tiene como objetivo recuperar la radiancia verdadera y/o la reflectancia de material de interés, esto lo hace corrigiendo diversos factores variables tales como la iluminación de la escena, condiciones atmosféricas, geometría de la vista y respuesta del instrumento.

➤ CORRECCIÓN GEOMÉTRICA

Este proceso corrige los desplazamientos y distorsiones geométricas presentes en una imagen, causados por la inclinación del sensor (posición del sensor en el momento de la toma), la influencia del relieve y los errores sistemáticos asociados con la imagen. Esta parte del proceso es determinante pues tiene implicaciones directas en la precisión de la posición de los resultados a obtener en el procesamiento, y en el caso de estimación de cambios entre coberturas garantiza que los cambios reportados entre dos imágenes de la misma zona y distintas fechas, se deban a cambios en las coberturas de la Tierra detectadas durante el periodo establecido, y no a diferencias en la posición de las imágenes en el periodo de análisis.

➤ REMUESTREO

Dado que la resolución espacial de las imágenes provenientes del sensor ASTER no es la misma en la región del VNIR y en las del SWIR, se debe hacer un Remuestreo para que la resolución espacial de todos los píxeles sea de 15 m.

➤ CORRECCIÓN ATMOSFÉRICA

Los procedimientos para la corrección atmosférica están diseñados para minimizar la dispersión de la atmósfera debido a que la dispersión incrementa la brillantez. Existen

dos tipos de corrección: la absoluta y la relativa, la absoluta requiere de información, datos meteorológicos y/o referencia de tierra, además de programas complicados, mientras que la relativa toma una banda (o imagen) como línea base y transforma las otras bandas (o imágenes) en correspondencia con esta o bien en cada banda toma como referencia el pixel más oscuro.

Con el fin de corregir el efecto de la atmósfera en las imágenes, se empleó el método de Sustracción del pixel oscuro propuesto por Chávez (1975). Se eligió este método de corrección debido a la ausencia de parámetros atmosféricos para poder realizar una corrección más precisa.

El método de sustracción del pixel oscuro se siguió de la siguiente manera, se analizó el histograma de los valores digitales de cada escena, en él, se puede observar que los valores más bajos no son cero, sino que tienen un valor mayor a cero, dicho incremento representa el valor aportado por la dispersión atmosférica para cada banda. Este incremento luego es sustraído, de tal forma que cada histograma comienza en cero (Campbell et al., 2011).

2. MEJORAMIENTO DE LA IMAGEN

Se le llama mejoramiento de la imagen a los procesos que permiten facilitar la visualización de la información en la imagen. Las técnicas utilizadas dentro de esta categoría sólo se pueden aplicar a la visualización de la información, por lo que los valores de números digitales que adquieren los pixeles durante la misma no representan los valores medidos y no pueden ser utilizados en procesos de extracción de la información o análisis estadístico.

❖ REALCE DE CONTRASTE

El contraste se refiere al rango de los valores de brillantez presentes en una imagen (Campbell, 2002). Este realce modifica la escala de grises para producir una imagen de mejor calidad, es una técnica utilizada para incrementar la diferencia entre el valor de un pixel y sus vecinos. Sin embargo, debido a que es un proceso que altera los valores

digitales representativos de la reflectancia de los materiales sólo se utiliza para mejorar la visualización de la información, y los productos de los procesos de realce no pueden ser utilizados para análisis numéricos posteriores.

Para aplicar esta técnica es necesario analizar el histograma de cada imagen, los métodos más comunes para obtener un realce de contraste son el stretch lineal, el stretch lineal con saturación y el stretch con ecualización.

En este caso se optó por stretch lineal con saturación de 1%, en el cual se satura el 1% de los píxeles más oscuros y el 1% de los píxeles más claros.

❖ REALCE ESPACIAL

Es una técnica que se emplea para la identificación de patrones y lineamientos los cuales se expresan como variaciones abruptas de brillantez. Esta técnica se encarga de aumentar o disminuir contrastes en la imagen modificando los valores de los píxeles, con base en los valores de los que lo rodean.

El realce espacial efectuado en el presente trabajo tiene como objetivo el hacer más visible las estructuras principales, para determinar en cada zona las estructuras predominantes y evaluar las posibilidades de su relación con el movimiento de fluidos termales y en el caso de sistemas fósiles con la mineralización.

En este trabajo el realce espacial se realizó sobre un modelo digital y la metodología que se siguió se describe a continuación:

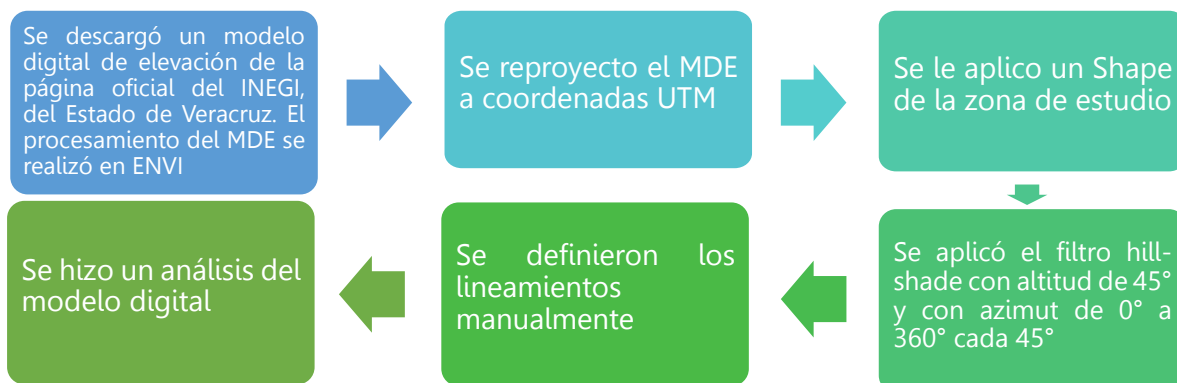


Figura 7. Diagrama de flujo de la metodología empleada para realizar el realce espacial sobre el modelo digital.

3. EXTRACCIÓN DE LA INFORMACIÓN

En esta etapa se tuvo como finalidad delimitar las principales zonas de alteración mediante la presencia de hidroxilos y óxidos, diferenciándolas de zonas cubiertas por vegetación que tienen una respuesta espectral similar. En este trabajo se utilizaron los métodos de cocientes de bandas y análisis de Componentes Principales; así mismo, se emplearon distintas composiciones en falso color y deformación del histograma para visualizar mejor los resultados, cabe mencionar que todas las técnicas utilizadas se realizaron en el software IDRISI.

Se realizó un mapeo en función a las firmas espectrales de los minerales asociados a la alteración argílica (figura 8 y figura 9), con base en los antecedentes de estudio.

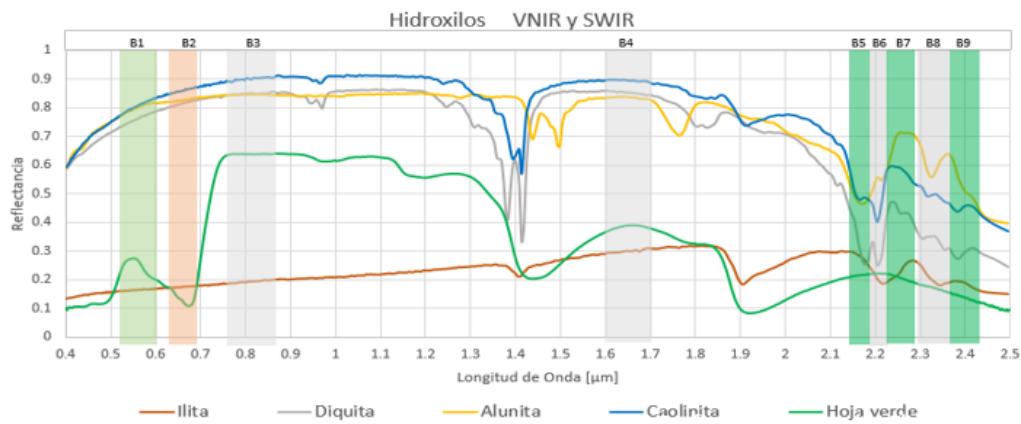


Figura 8. Muestra las Firmas espectrales de los hidroxilos con el rango de cada banda de Aster

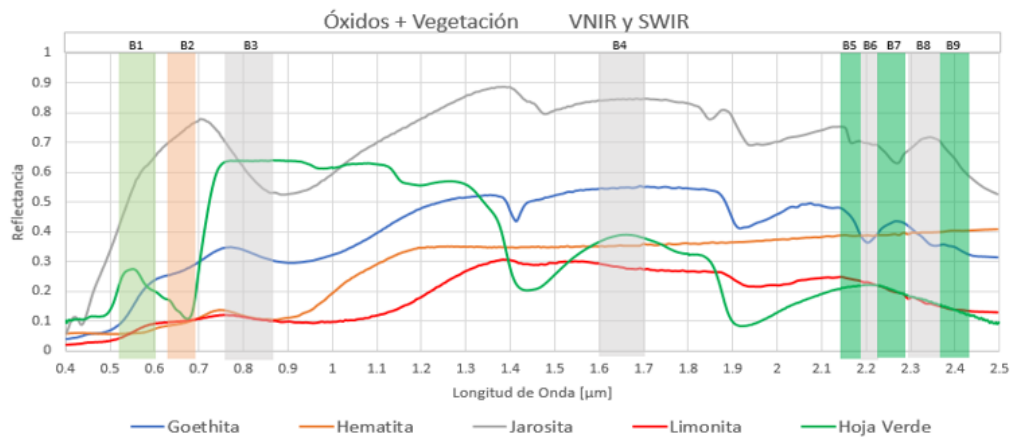


Figura 9. Muestra las Firmas espectrales de los Óxidos con el rango de cada banda de Aster

- COCIENTE DE BANDAS

Es el realce que resulta de la división de los números digitales de una banda del espectro por los números digitales correspondientes en otra banda; es importante resaltar que es necesario el análisis de la firma espectral de cada material debido a que las bandas en cada cociente son bandas que representan a los picos más altos de reflectancia y absorbancia, gracias a esta técnica se pueden discriminar variaciones espectrales que son enmascaradas por las variaciones de brillantez en las imágenes. A continuación, se describe el procedimiento realizado para la obtención del cociente de bandas:

- 1) Reclasificación de las bandas. Al realizar la corrección atmosférica las bandas contienen píxeles cuyo número digital (ND) es cero y al realizar un cociente, existe un problema de indeterminación; por lo tanto, se realiza una reclasificación donde todos los píxeles con ND=0 ahora serán igual a 1.
- 2) Se realiza el cociente de bandas donde la banda de mayor reflectancia está en el numerador y la banda de mayor absorbancia reclasificada en el denominador, estas bandas se eligen con base en las características de la firma espectral de la vegetación, óxidos e hidroxilos, tabla 3.2.1.3.
- 3) Para la visualización se realiza un ajuste al histograma con saturación de 2% o de 1% de la imagen del cociente de bandas, debido a que los números digitales de la imagen disminuirán drásticamente (al realizarse el cociente), por eso se ajusta el histograma.

Sensor	Vegetación	Hidroxilos	Óxidos
ASTER	B3/B2	B4/B6	B2/B1

Tabla 7. Cocientes de bandas para resaltar la respuesta espectral de diferentes coberturas en imágenes ASTER.

- ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES

El análisis de componentes principales conocido como PCA por sus siglas en inglés, es un método de estadística multivariada, el cual, a partir de un conjunto de variables posiblemente correlacionadas se obtiene un nuevo conjunto de variables sin correlación

lineal llamadas componentes principales, esto se realiza encontrando un nuevo sistema de ejes ortogonales, a través de una transformación lineal que incluye una rotación y traslación, que maximicen la variabilidad de los datos (Kalinowski, 2004).

La transformación origina nuevos valores de DN para cada pixel, relativos a los nuevos ejes coordenados. Un nuevo paquete de valores de ND; es creado respecto al primer nuevo eje, conformando la primera componente principal. Del mismo modo ocurre para cada nuevo eje creado, creándose tantas componentes principales como variables se tengan en el conjunto original de datos (Sabins, 1997; Khorram *et al.*, 2012).

PCA es una técnica de análisis multivariable, su análisis incluye como resultados:

- Matriz de varianza-covarianza
- Matriz de correlación entre bandas.
- Imágenes de las componentes principales
- Carga de cada banda en las componentes principales

-Análisis de componentes principales, técnica de Crosta & Moore (1989).

Esta técnica propone el uso de un menor número de bandas, basado en la respuesta espectral de las diferentes coberturas, para elegir estas bandas es necesario examinar la matriz de carga de los eigenvectores de una selección específica de seis o cuatro bandas, para decidir cuál de las componentes principales de la imagen concentra información directamente relacionada con la firma espectral teórica de los objetivos específicos.

El proceso para realizar este análisis, es el siguiente:

- 1) Se utilizaron como datos de entrada las bandas características para resaltar los óxidos y los hidroxilos, estas bandas son las propuestas en la tabla 8.
- 2) Para seleccionar las dos nuevas variables o componentes principales que aporten mayor información para el realce de óxidos e hidroxilos, se analizó el conjunto de datos multivariados: matriz de correlación y matriz de carga.

- 3) Se aplicó una deformación lineal del histograma con saturación del 1% para desplegar y mejorar la visualización de las dos componentes elegidas.

Sensor	Hidroxilos	Óxidos
ASTER	B3, B4, B5, B6	B1, B2, B3, B4

Tabla 8. Bandas para resaltar la respuesta espectral de diferentes coberturas en imágenes ASTER

-Análisis de componentes principales dirigidas (Fraser, 1991)

Este método es una variación del análisis PCA ordinario, y consiste en ingresar al proceso estadístico cocientes de bandas con objetivos específicos, con la finalidad de obtener componentes con la mayor cantidad de información espectral de un material en específico.

Con el fin de resaltar más la diferencia espectral entre las zonas alteradas y el resto del terreno, en la porción centro de la zona de estudio, se aplicó el método de Fraser (1991) denominado Análisis de Componentes Principales Dirigidas (DPCA).

El proceso para realizar este análisis, es el siguiente:

- 1) Se utilizaron como datos de entrada, los cocientes resaltados en la tabla 3.2.1.3, para identificar tanto óxidos como hidroxilos.
- 2) Para seleccionar las dos nuevas variables o componentes principales que aporten mayor información para el realce de óxidos e hidroxilos, se analizó el conjunto de datos multivariados: matriz de correlación y matriz de carga.
- 3) Se aplicó una deformación lineal del histograma con saturación del 1% para desplegar y mejorar la visualización de las dos componentes elegidas.

- MAPEO DE ÁNGULO ESPECTRAL (SAM por sus siglas en inglés)

SAM es un método automatizado para la comparación de firmas espectrales de la imagen con librerías espectrales. Los algoritmos de SAM determinan la similitud entre las dos firmas espectrales calculando el ángulo espectral entre ellos, tratándolos como unidades

vectoriales en el espacio espectral con dimensionalidad espectral igual al número de bandas.

Para este procedimiento se utilizaron imágenes ASTER y el programa ENVI, ya que estas imágenes tienen un mayor número de bandas espectrales por lo que resulta más fácil y precisa la detección de algunos minerales de acuerdo a su firma espectral. Lo que se pretende mapear con ángulo espectral son los sitios donde se recolectaron las muestras alteradas en campo, para compararlas con otras zonas que presenten la misma respuesta espectral.

En las muestras recolectadas en el campo se identificó la firma espectral de algunos minerales de alteración hidrotermal como la illita y la montmorillonita.

4. RESULTADOS

4.1 RESTAURACIÓN DE LA IMAGEN

➤ CORRECCIÓN ATMOSFÉRICA

Con el método de Sustracción de Pixel Oscuro se corrigió el efecto atmosférico, haciendo la resta aritmética del mínimo valor a cada banda, de tal forma que los números digitales de la imagen resultante empezaran en cero.

Bandas sin corrección atmosférica	Valor mínimo	Valor máximo	Bandas con corrección atmosférica	Valor mínimo	Valor máximo
B1	41	216	B1	0	175
B2	22	234	B2	0	212
B3	17	240	B3	0	223
B4	11	184	B4	0	173
B5	4	237	B5	0	233
B6	0	249	B6	0	249
B7	0	255	B7	0	255
B8	6	255	B8	0	249
B9	2	255	B9	0	253

Tabla 9. Valores máximos y mínimos de las bandas originales y de las corregidas con el método de sustracción del pixel oscuro.

4.2 MEJORAMIENTO DE LA IMAGEN

➤ REALCE ESPACIAL

Con base en el modelo digital de elevación con iluminación artificial se pudieron delimitar los principales lineamientos dentro del área de estudio.

A continuación, se muestran los lineamientos obtenidos junto con el modelo digital de elevación con iluminación artificial:

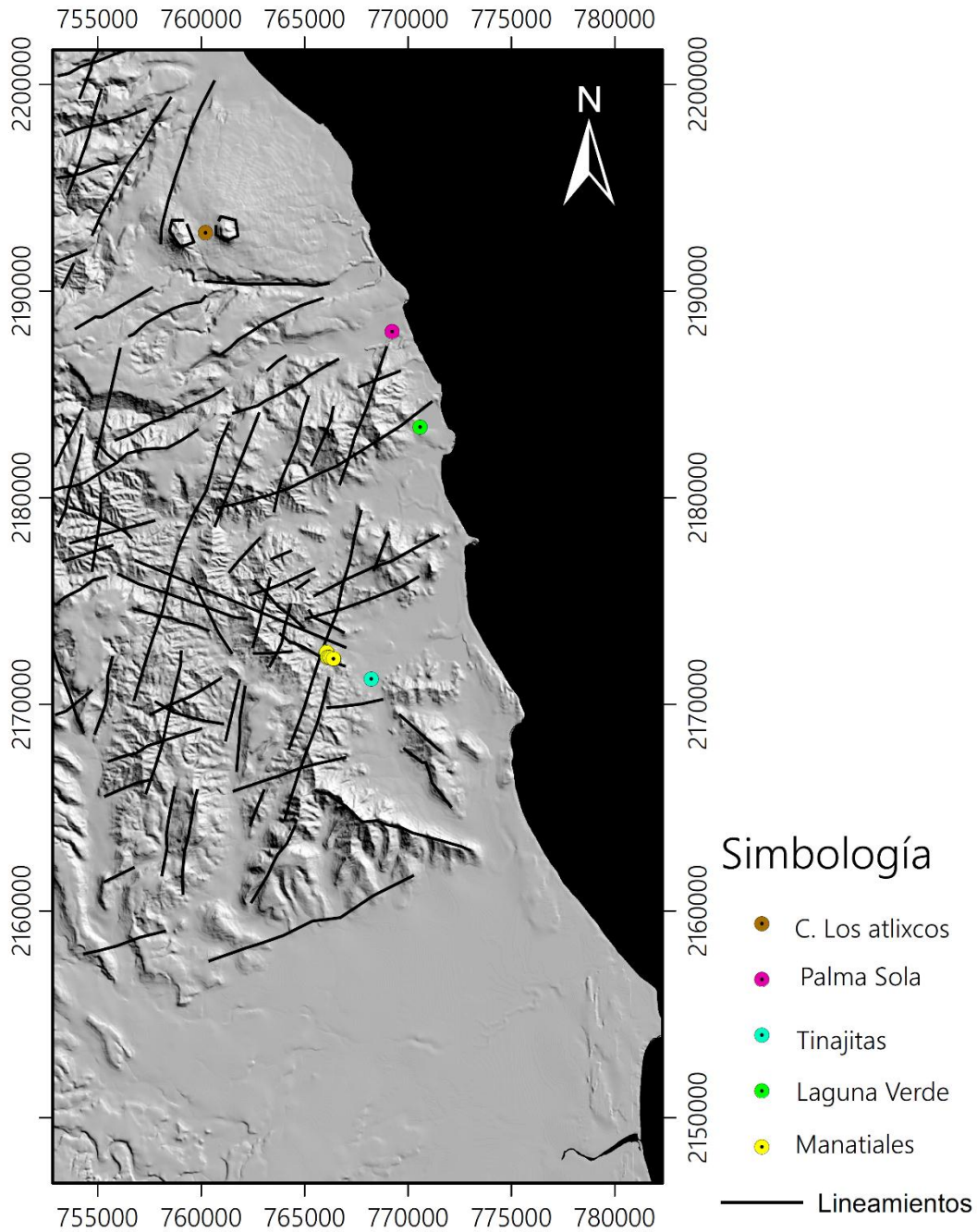


Figura 10. La imagen muestra los principales lineamientos obtenidos a partir del MDE

Se puede observar que la mayoría de los lineamientos presentan una dirección preferencial NW y SW, lo que concuerda con los sistemas de fracturamiento reportados en campo: uno con dirección preferencial NW (15° - 25° Y 60° - 70°) y el segundo con una dirección SW (40° - 50° y 15° - 25°).

4.3 EXTRACCIÓN DE LA INFORMACIÓN

Los procesos realizados a continuación se basaron en la firma espectral de la hematita en representación a los óxidos, mientras que en representación a los hidroxilos se tomó en cuenta las firmas espectrales de las asociaciones típicas para alteración argílica.

➤ COCIENTE DE BANDAS

Dado que ASTER tiene mayor número de bandas en SWIR se puede realizar un análisis más detallado, para encontrar los minerales provenientes de la alteración mineral.

A continuación, se muestran las imágenes obtenidas a partir del realce espectral mediante cociente de bandas, los cocientes utilizados son los propuestos en la tabla 7.

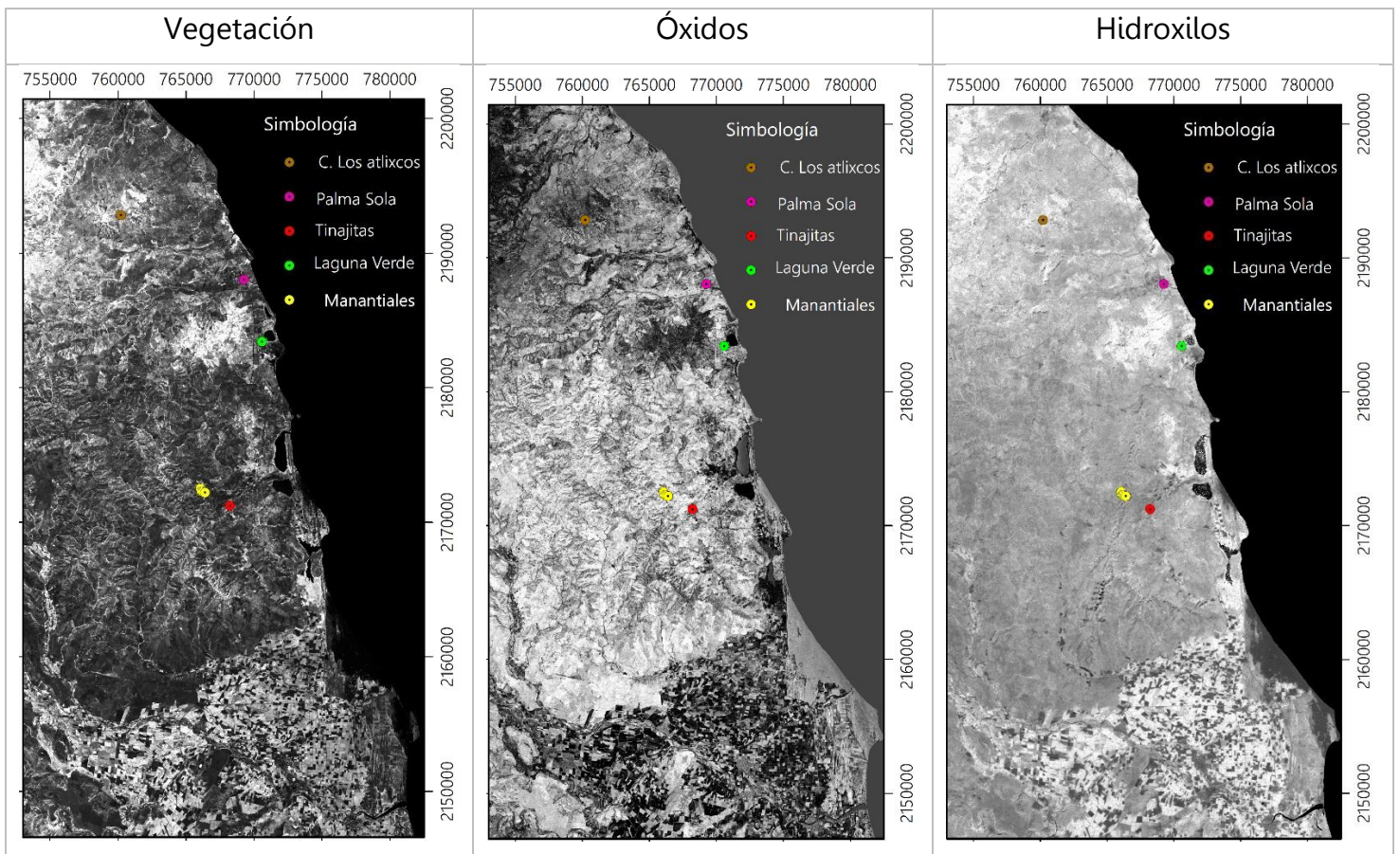


Tabla 10. Muestra los Stretch con saturación del 1.5% de cada uno de los cocientes de bandas. Los colores brillantes muestran la presencia del respectivo material mientras que los colores oscuros indican la ausencia de éste.

Se puede observar que no es posible diferenciar hidroxilos de vegetación, ya que ambos materiales tienen alta reflectancia en las longitudes de onda de 1.6 a 1.7, por lo que será necesario aplicar análisis de componentes principales tanto por el método de Crosta y el Fraser, para obtener variables que delimiten mejor la zona de hidroxilos.

En la tabla 10 se muestran los resultados obtenidos a partir de la técnica de cocientes de bandas para resaltar vegetación, óxidos de hierro e hidroxilos, dichos resultados muestran zonas con presencia de píxeles brillantes, las cuales indican la existencia de la cobertura a resaltar en cada uno de los cocientes.

La característica principal de la técnica de cocientes de banda, se encarga de enfatizar la respuesta del material objetivo y al mismo tiempo minimizar la respuesta de otros componentes en la imagen. Para resaltar la vegetación en tonos blancos (Tabla 10), se realizó un cociente de las bandas B3/B2 debido a que la banda 3 contiene la información de alta reflectancia de la vegetación. La importancia de este cociente radica en conocer cuanto afectará la presencia de la vegetación.

Para resaltar los óxidos de hierro en tonos blancos (Tabla 10), se realizó el cociente de las bandas B2/B1 debido a que la banda 2 contiene la información de alta reflectancia de los óxidos de hierro, en la tabla 10 se puede apreciar que la presencia de óxidos está muy marcada en la porción central de la imagen.

Para resaltar los hidroxilos en tonos blancos (Tabla 10), se realizó el cociente de las bandas B4/B6 debido a que este cociente nos realza zonas de alteración argílica reportada por el SGM (Carta geológica Veracruz E14-3) la cual está presente en la zona de estudio.

➤ ANALISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES, TÉCNICA DE CROSTA Y MOORE (1989).

Como se mencionó anteriormente, con la finalidad de obtener mejores resultados y separar la respuesta espectral de los hidroxilos y los óxidos del efecto de la vegetación se utilizó el Análisis de Componentes Principales (PCA), propuesta por Loughlin (1991), la cual aplica el PCA únicamente a cuatro bandas.

- Óxidos

Las bandas utilizadas en el análisis de los óxidos fueron las mencionadas en la tabla 8.

	C1	C2	C3	C4
%Varianza	93.938672	5.365818	0.572311	0.123204
Valor característico	571.577	42.73513	10.1358	4.2222
Matriz de Eigenvectores				
Vector característico	C1	C2	C3	C4
1	0.914776	-0.03778	-0.149475	-0.83188
2	0.292367	-0.07854	-0.462413	0.622057
3	0.251088	-0.06740	0.741749	0.057062
4	0.121081	0.84773	-0.007391	0.018451
Matriz de Carga				
Bandas	C1	C2	C3	C4
B1	0.976	-0.0414	-0.118	-0.183
B2	0.915	-0.0831	-0.368	0.141
B3	0.838	-0.0443	0.541	0.056
B4	0.115	0.7931	-0.006	0.014

Tabla 11. Análisis de componentes principales para identificar Óxidos

La tabla 11. describe la transformación lineal de componentes principales de las bandas 1, 2, 3 y 4 de la imagen ASTER. De la magnitud y signo de los vectores característicos se tiene que la componente principal uno (C1) representa vectores característicos positivos

en todas las bandas. El valor característico (571.577) de la C1 representa el 93.938672% de la varianza de los datos por lo que puede ser interpretada como el efecto topográfico y el albedo de las imágenes originales

Por otro lado, en la tabla 4.3.2 se puede observar que la componente cuatro (C4) nos ayuda a resaltar los óxidos, debido a que en los rangos de longitud de onda de las bandas 2 y 1, se encuentra el rasgo de reflectancia máxima y mínima de los óxidos, tales como la hematita (Ruiz-Armenta & Prol-Ledesma, 1998), por lo que los pixeles influenciados por la presencia de óxidos se presentan en tonos brillantes debido a los valores negativos de carga de la banda 1 y a los valores positivos de la banda 2. Mientras que la componente 3 (C3), nos ayuda a resaltar la vegetación debido a que los pixeles influenciados por la presencia de esta se presentan en tonos brillantes debido al valor positivo y magnitud de la carga del vector característico en B3 y a la magnitud negativa de B2.

- Hidroxilos

Las bandas utilizadas en el análisis de los óxidos fueron las mencionadas en la tabla 8.

	C1	C2	C3	C4
%Varianza	98.362502	0.885201	0.745625	0.006678
Valor característico	845.6588	616.8008	85.092705	7.643802
Matriz de Vectores Característicos				
Vector característico	C1	C2	C3	C4
1	0.978322	-0.709301	0.03285	-0.00924
2	0.129745	0.158724	-0.49906	-0.00469
3	0.106602	0.378705	0.120471	-0.06687
4	0.121193	0.203230	0.099736	0.068802

Matriz de Carga				
Bandas	C1	C2	C3	C4
B3	0.917	-0.398	0.019	-0.008
B4	0.974	0.091	-0.207	-0.002
B5	0.982	0.141	0.099	-0.065
B6	0.984	0.136	0.088	0.067

Tabla 12. Matriz de carga obtenida del PCA con la técnica de Crosta, & Moore (1989), ingresando las bandas 2, 4,5 y 6 de ASTER para la detección de zonas de alteración por hidroxilos.

En la tabla 12. Se puede apreciar que los valores de carga en la componente 2 (C2) muestran la presencia de hidroxilos en tonos brillantes debido al valor positivo y magnitud de la carga del vector característico del cociente de bandas de B4/B6 y a la magnitud negativa del cociente característico de la vegetación. Sin embargo, si queremos mostrar los pixeles influenciados por la presencia de vegetación en tonos brillantes es necesario multiplicar la C2 por un (-1).

En la tabla 13. Se muestran los resultados de los análisis de componentes principales con las técnicas de Crosta para óxidos, vegetación e hidroxilos, donde los pixeles brillantes representan a los diferentes materiales.

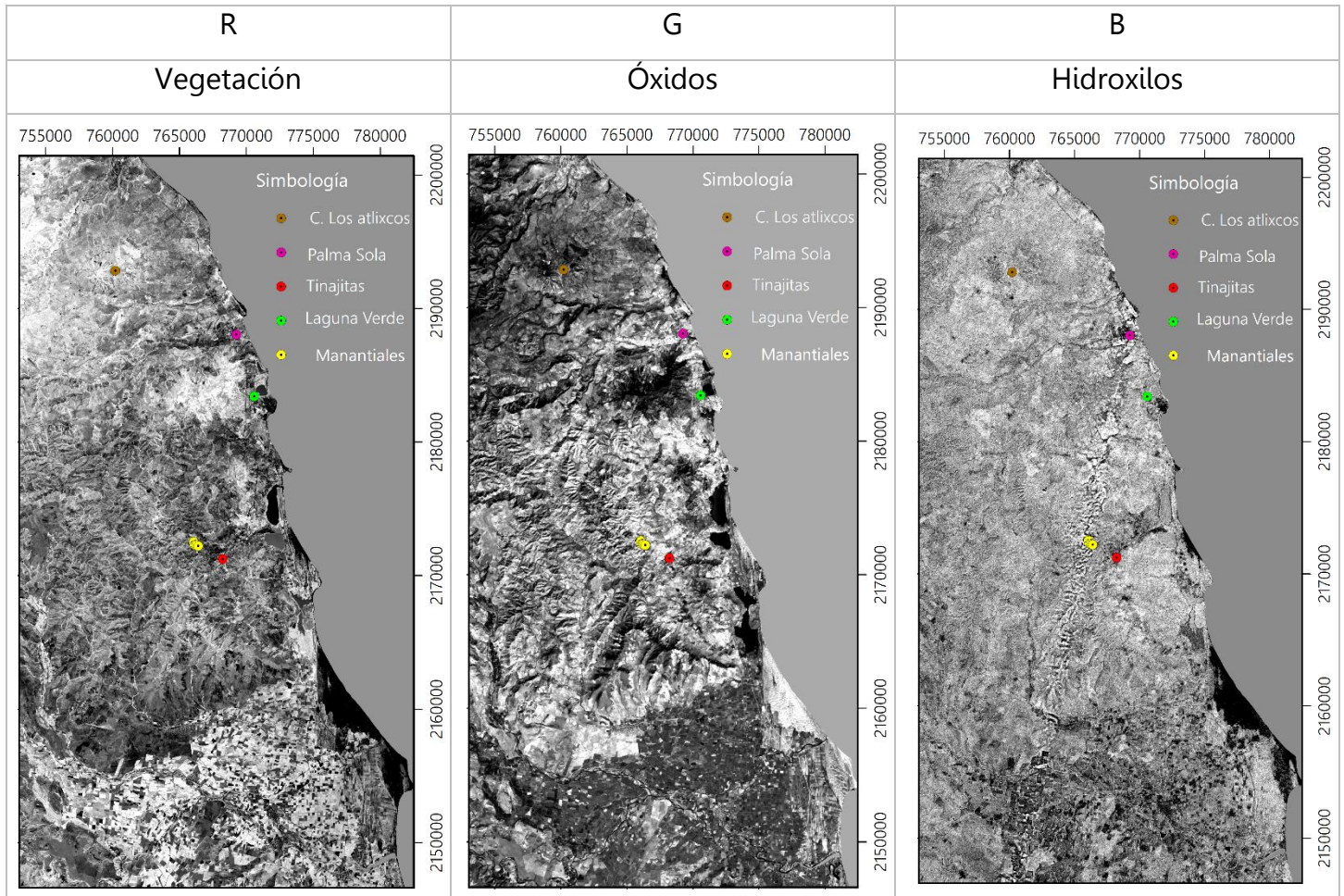


Tabla 13. Muestra los Stretch con saturación del 1% de cada uno de las componentes principales. Los colores brillantes muestran la presencia del respectivo material mientras que los colores oscuros indican la usencia de éste.

A continuación, se presenta la composición a falso color (R= vegetación, G= Óxidos y B= hidroxiolos) realizado por el análisis de componentes principales con la técnica de Crosta utilizando como base de entrada 4 bandas que representan los rasgos espectrales más característicos, en la figura 11, se muestran los resultados de esta composición, donde los tonos cian representan a la zona de alteración mineral, debido a que los óxidos se muestran en tonos verdes y los hidroxiolos en tonos azules; en cuanto a la vegetación se puede apreciar en tonos de rojo sin embargo estos se encuentran entremezclados con los tonos magenta debido a la aportación de píxeles en color azul propio de los hidroxiolos, recordando que la respuesta espectral de la vegetación es similar en ciertas bandas a la respuesta del grupo de los hidroxiolos.

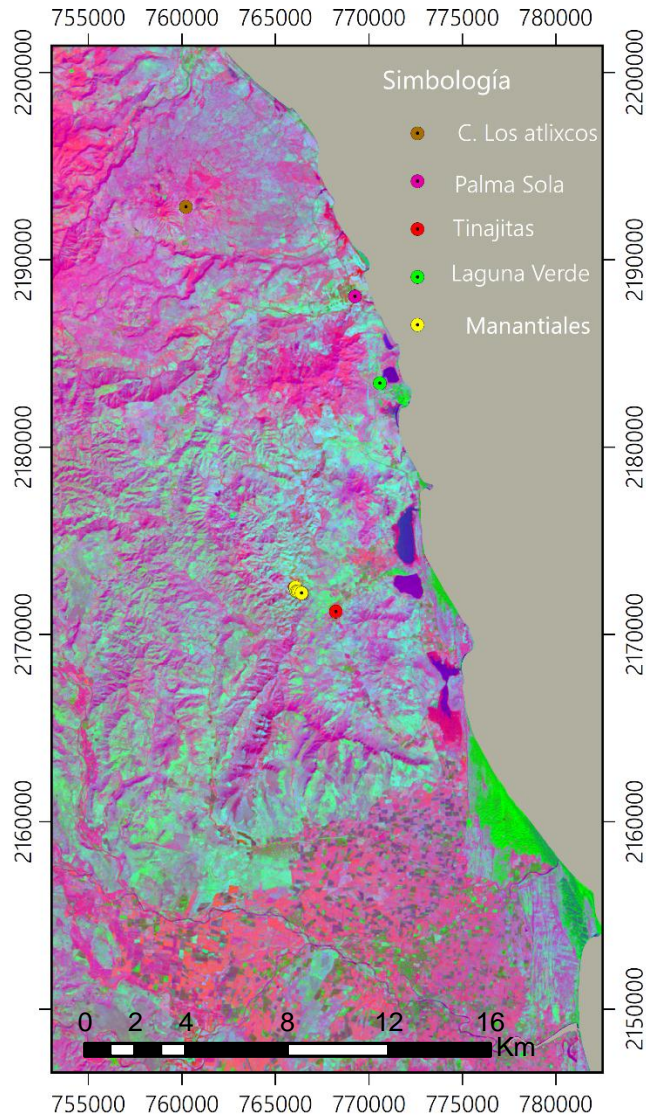


Figura 11. Composición RGB de las componentes principales de la Tabla 13. Las zonas de interés se despliegan en tonos color cian, debido a que muestran la convergencia de los óxidos con los hidroxilos.

➤ ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES DIRIGIDAS (FRASER, 1991)

En este análisis las imágenes que se muestran compensan las variaciones por las condiciones de iluminación de la escena. Al aplicar esta técnica se aíslan las diferencias espectrales de los materiales en la superficie.

Las bandas utilizadas en el análisis para los óxidos e hidroxilos fueron las mencionadas en la tabla 7.

- Óxidos

	C1	C2
% Varianza	98.843965	1.156033
Valor característico	2.221971	0.0259
Matriz de Vectores característicos		
Vector característico	C1	C2
1	0.99548	-0.03071
2	0.030071	0.99548
Matriz de Carga		
Cociente de Bandas	C1	C2
$\frac{B3}{B2}$	0.99995	-0.003254
$\frac{B2}{B1}$	0.268010	0.963416

Tabla 14. Matriz de carga obtenida del PCA con la técnica Fraser (1991), ingresando los cocientes de bandas B4/B6 y B2/B1 para la detección de zonas de alteración por óxidos y vegetación.

De los valores de las cargas de los cocientes de bandas descritos en la Tabla 14. En la componente 2 (C2) se tiene que los pixeles influenciados por la presencia de óxidos se presentan en tonos brillantes debido al valor positivo y magnitud de la carga del vector característico en el cociente B2/B1 y a la magnitud negativa del cociente característico de la vegetación.

- Hidroxilos

En la tabla 15, se puede apreciar que los valores de carga en la componente 2 (C2) muestran la presencia de hidroxilos en tonos brillantes debido al valor positivo y magnitud de la carga del vector característico del cociente de bandas de B4/B6 y a la

magnitud negativa del cociente característico de la vegetación. Sin embargo, si queremos mostrar los pixeles influenciados por la presencia de vegetación en tonos brillantes es necesario multiplicar la C2 por un (-1).

	C1	C2
%Varianza	90.838051	9.161950
Valor característico	4.277695	0.431449
Matriz de vectores característicos		
Vector característico	C1	C2
1	0.731431	-0.681915
2	0.681915	0.731431
Matriz de Carga		
Cocientes de Bandas	C1	C2
$\frac{B3}{B2}$	0.958853	-0.283902
$\frac{B4}{B6}$	0.946586	0.322451

Tabla 14. Matriz de carga obtenida del PCA con la técnica de Fraser, ingresando los cocientes de bandas B3/B2 y B4/B6 para la detección de zonas de alteración por hidroxilos y vegetación.

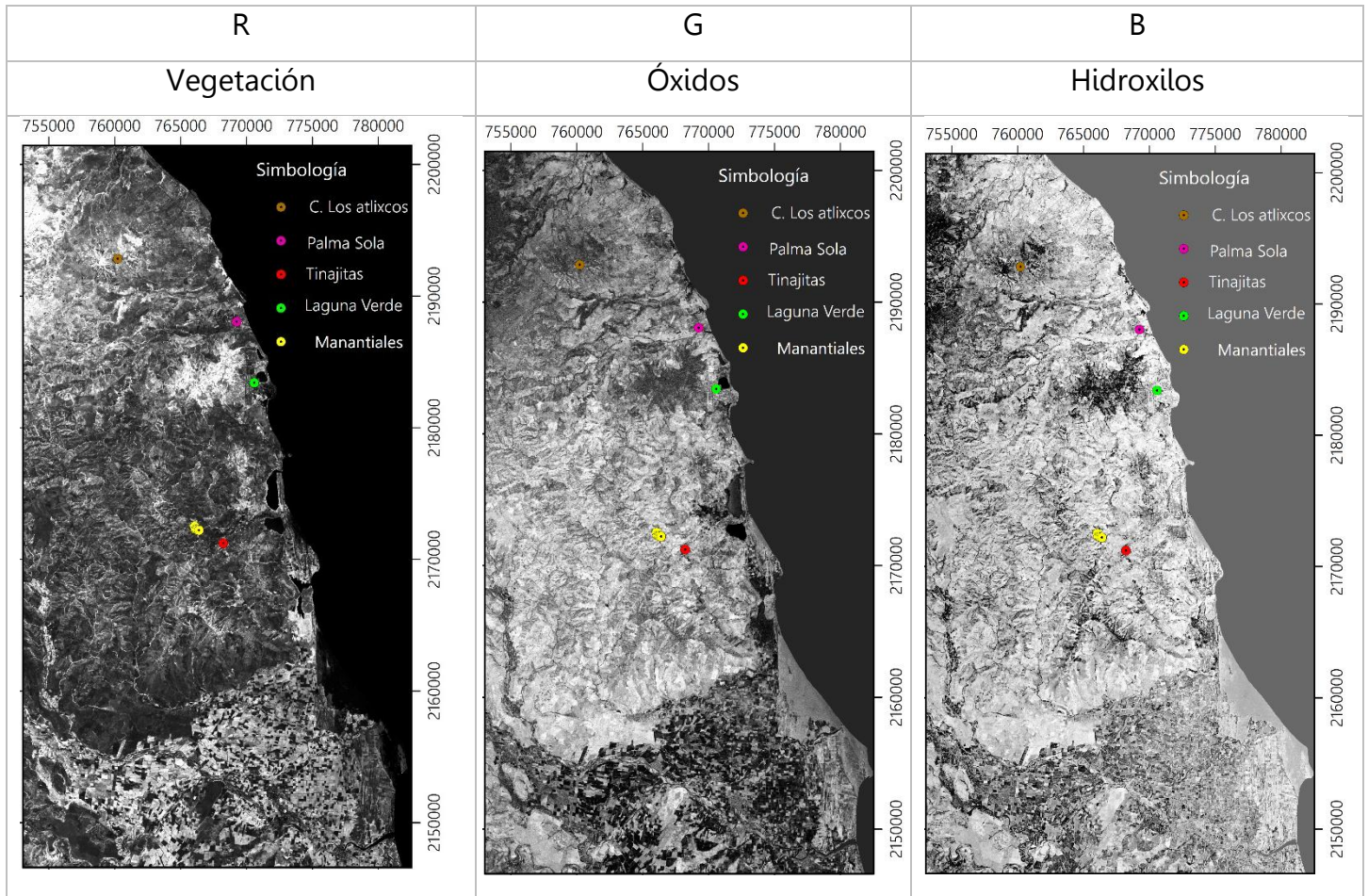


Tabla 15. Muestra los Stretch con saturación del 1% de cada uno de las componentes principales. Los colores brillantes muestran la presencia del respectivo material mientras que los colores oscuros indican la ausencia de éste.

A continuación, se presenta la composición a falso color (R= vegetación, G= Óxidos y B= hidroxiolos) realizado por el análisis de componentes principales con la técnica Fraser, utilizando como base de entrada el cociente que representa los rasgos espectrales más característicos, en la figura 12, se muestran los resultados de esta composición, donde los tonos cian representan a la zona de alteración mineral, debido a que los óxidos se muestran en tonos verdes y los hidroxiolos en tonos azules; cabe mencionar que en esta composición se el color cian está influenciado por más píxeles azules ya que al hacer el análisis de componentes principales los hidroxiolos tiene gran presencia en el área de estudio, en cuanto a la vegetación se puede apreciar en tonos de rojo.

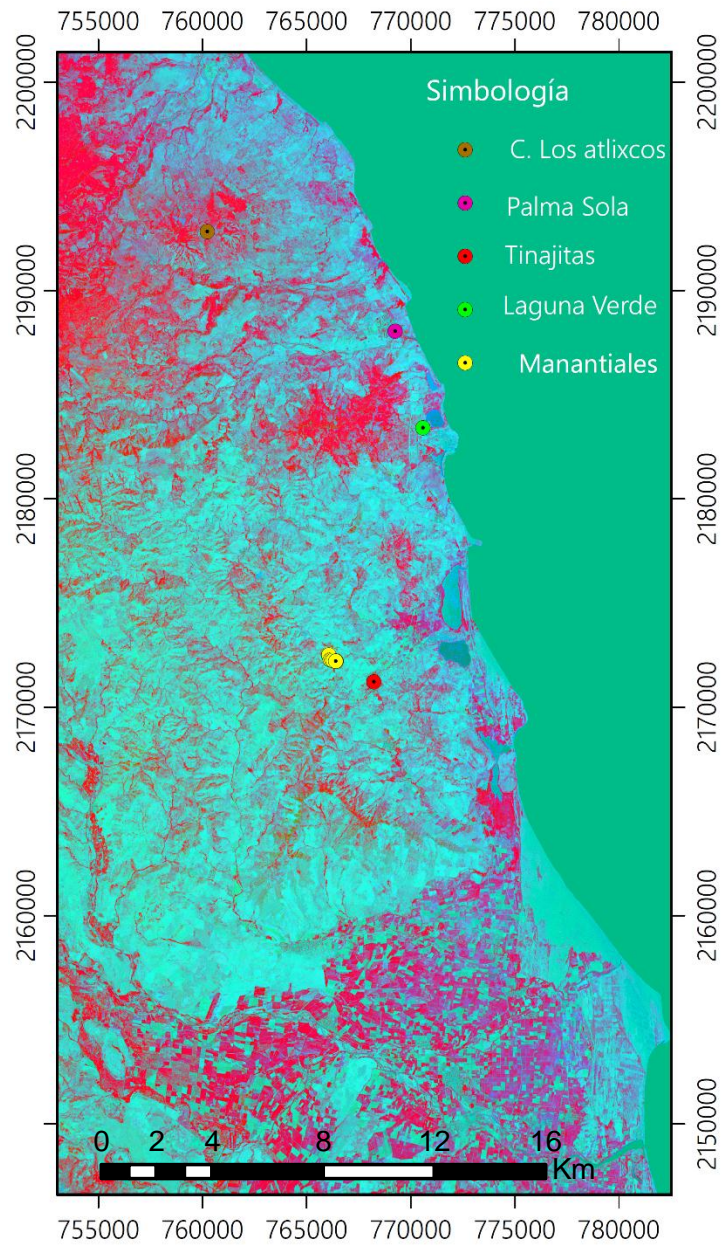


Figura 12. Composición RGB de las componentes principales dirigidas de la Tabla 15. Las zonas con alteración mineral se presentan en color cian.

➤ MAPEO DE ÁNGULO ESPECTRAL (SAM)

Se obtuvieron resultados satisfactorios ya que se logró mapear con ángulo espectral las muestras alteradas recopiladas en campo. La figura 13 muestra la mascararas en color amarillo que representan a los minerales illita y montmorillonita, sobre la multiplicación de las componentes principales dirigidas que representan a los óxidos y a los hidroxilos con el fin de analizar la convergencia de estos junto con los minerales ya mencionados. Se puede ver que el mapeo de estos minerales coincide con la alteración mineral reportada con PCA con la técnica de Fraser, (1991).

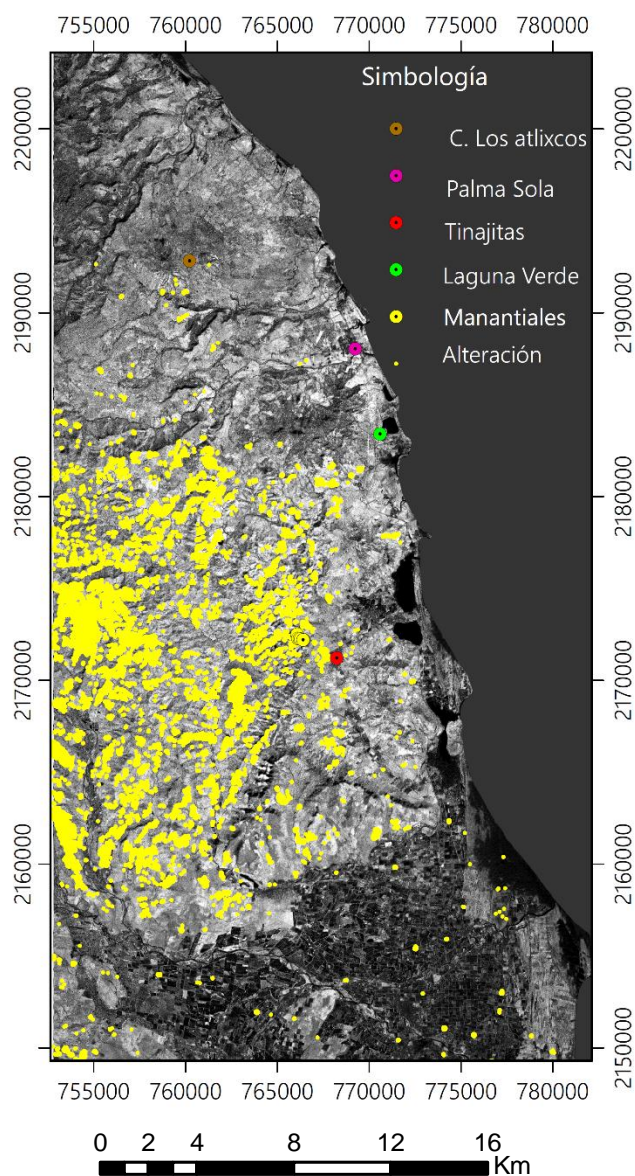


Figura 13. Muestra la máscara de los minerales illita y montmorillonita con la firma espectral obtenida en campo, sobre la multiplicación de las componentes dirigidas que representan a los óxidos e hidroxilos con stretch de 2%.

5. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

La Percepción remota juega un papel importante dentro de los proyectos en las etapas tempranas de exploración de sistemas de origen hidrotermal (Prol-Ledesma et al., 1993) y el trabajo aquí presentado no es la excepción.

Con base en todos los resultados obtenidos, se tiene el propósito de analizar, integrar e interpretar la información para localizar las zonas con mayor potencial geotérmico y/o minero, para en el futuro realizar exploración a detalle en dichas zonas.

5.1 INTEGRACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

A continuación, se presentan los mapas como resultado de integrar la información obtenida del realce espacial y espectral.

La figura 14, muestra la aportación de esta tesis, puesto que es el resultado de un conjunto de técnicas de preprocesamiento y procesamiento de imágenes satelitales (ASTER) y del modelo digital de elevación del terreno del estado de Veracruz, las cuales sirvieron para identificar la presencia de distintas coberturas terrestres (óxidos de hierro, hidroxilos y vegetación), así como proponer zonas potenciales, con base en la coexistencia de zonas con alteración hidrotermal y debilidad estructural, combinación indicadora de sistemas hidrotermales (Canet et al., 2015).

Al hacer el realce espectral, el método de Análisis de Componentes Principales Dirigidas aplicado a 2 bandas (cocientes de bandas) (Fraser, 1991), fue el que mostró mejores resultados, debido a que se eliminó la información redundante e incluso se pudo observar una correcta separación de la información representativa de la vegetación y de las zonas con hidroxilos típicos de la alteración argílica (Tabla 15).

La figura 14, muestra la convergencia de los óxidos e hidroxilos en tonos brillantes, misma que resulta de la multiplicación de las componentes principales dirigidas mostradas en la tabla 15 que muestran la presencia de los óxidos y los hidroxilos respectivamente; con el

fin de priorizar la alteración mineral y al mismo tiempo reducir la presencia de vegetación al mínimo junto con los lineamientos obtenidos por el realce espacial.

De acuerdo a lo anterior, se aprecia en tonos blancos zonas con la presencia de hidroxilos y de óxidos de hierro, mientras que en tonos oscuros se resaltan las zonas con amplia vegetación; se puede notar que en la esquina superior izquierda se aprecia abundancia de vegetación que se generó sobre cuerpos ígneos, no obstante, en la esquina inferior derecha igual se aprecia abundancia de vegetación, sin embargo, esta está asociada a zonas de cultivo.

La región central-este del área de estudio muestra la zona con mayor alteración mineral, en zonas de sedimentos recientes y cuerpos ígneos.

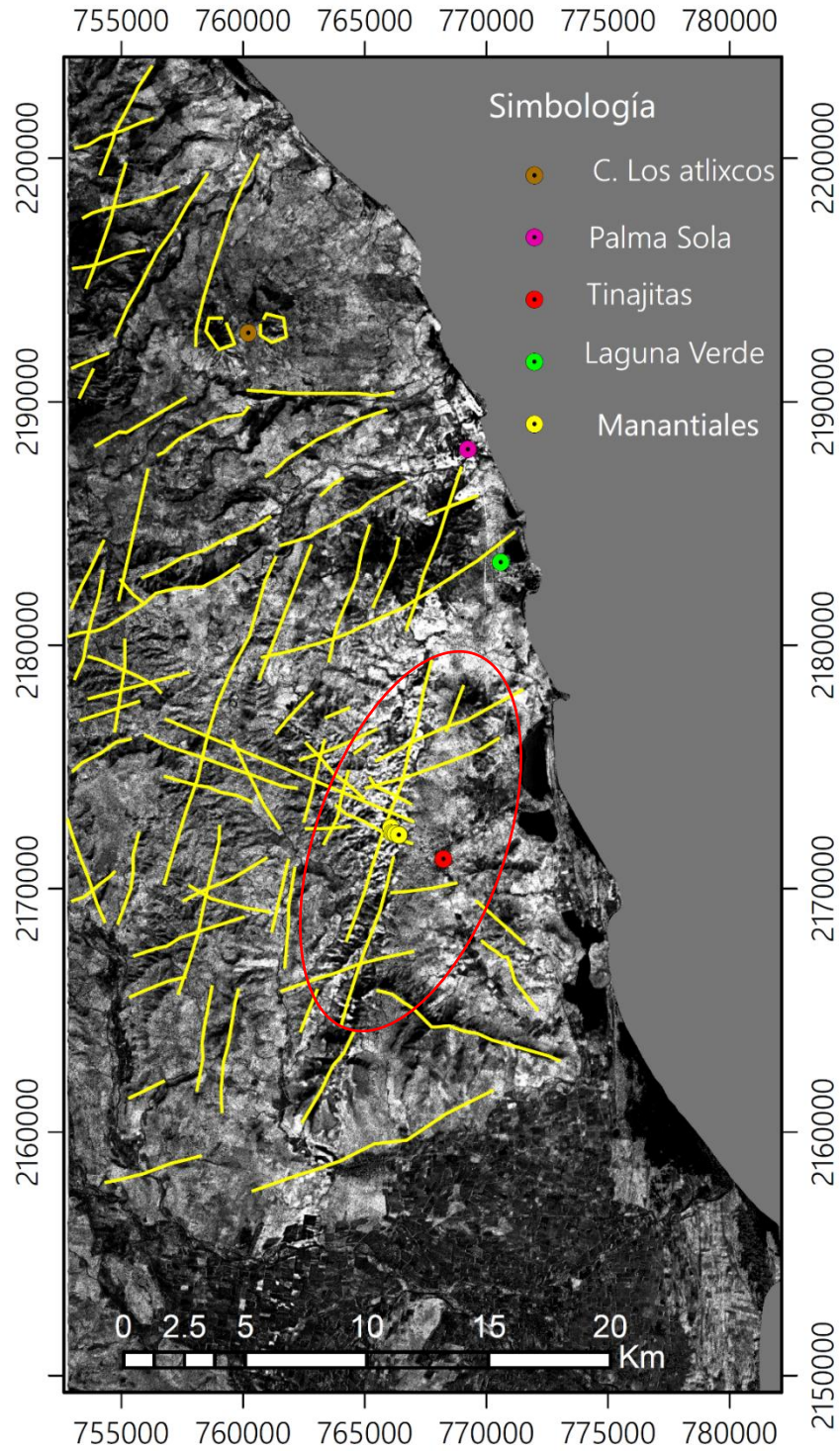


Figura 14. Mapa integrado con los lineamientos y con la convergencia de los hidroxilos y óxidos mostrados en la tabla 15 con un contraste con saturación de 1%, el ovalo rojo muestra la zona de interés.

Para la exploración geotérmica se correlacionan zonas con la presencia de minerales típicos de alteración hidrotermal, la ocurrencia de lineamientos, afloramientos de rocas volcánicas recientes y estructuras geológicas. Por eso la zona de mayor interés se muestra en la Figura 14 (ovalo rojo); se puede observar como la mayor alteración mineral se orienta a lo largo una gran falla orientada en dirección NE y pequeñas fallas en dirección NW, por otro lado, se aprecia que en el centro de nuestra zona de interés, en el centro del Poblado Los Baños, convergen fallas en dirección NW y NE, lo que resulta de gran importancia para la permeabilidad y se puede comprobar puesto que en la zona hay presencia de manifestaciones termales (manantiales calientes). Por todo lo anterior, se concluye que la zona para realizar estudios geofísicos a detalle o pozos exploratorios, se encuentra al oeste de la laguna de Farallón en el poblado de Los Baños (zona remarcada en el ovalo rojo). Sin embargo, existen más zonas con alto contenido de alteración mineral pero que no convergen con lineamientos (Palma Sola y Sur de la Laguna Farallón). La figura 15 muestra la zona con alteración argílica reportada por el SGM, junto con la carta Geológica E-14, mostrando su incidencia con la alteración mineral presente en tonos brillantes obtenida a partir del análisis de componentes principales dirigidas.

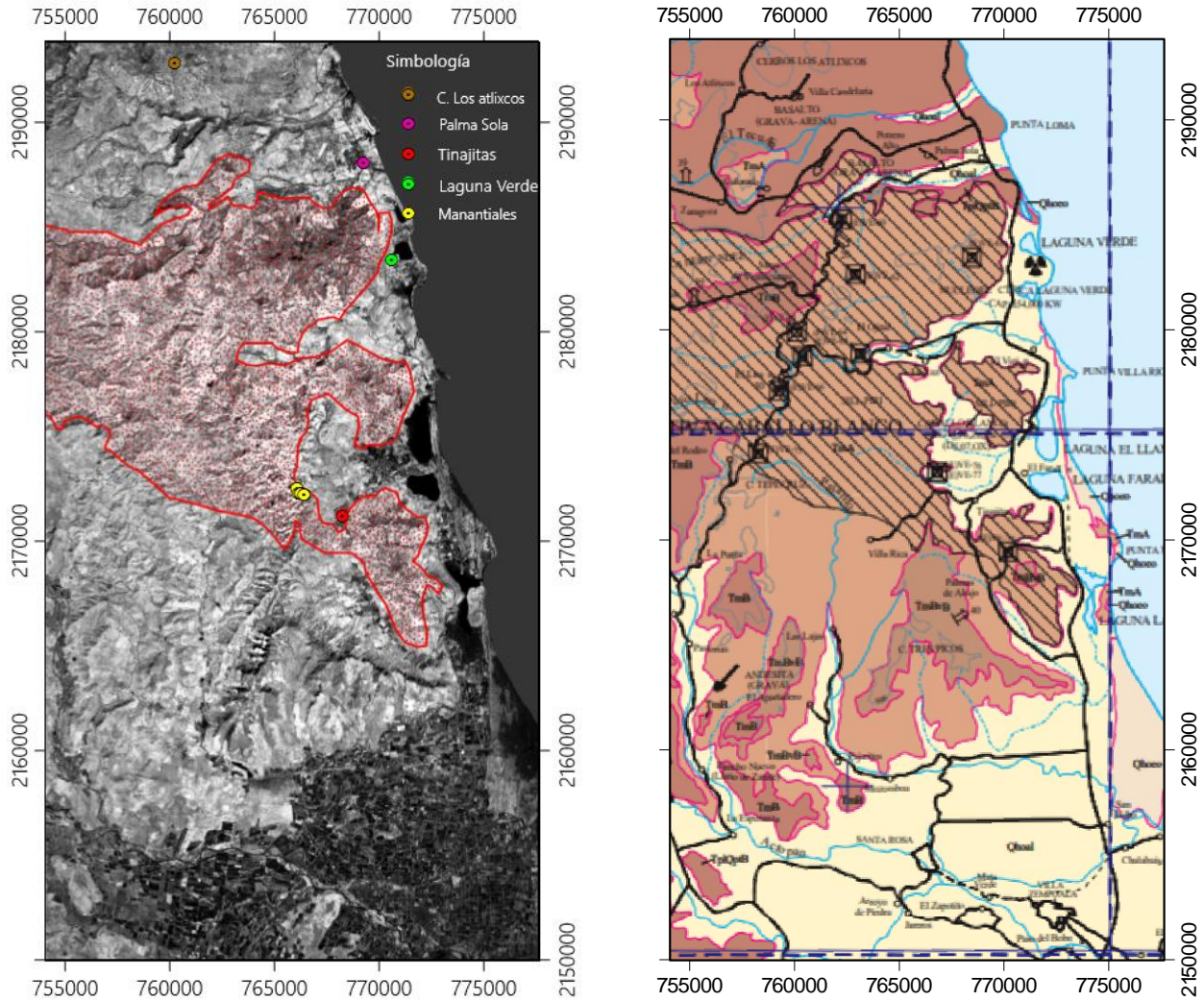


Figura 15. Mapa integrado muestra la convergencia de los hidroxilos y óxidos mostrados en la tabla 15 con un contraste con saturación de 1%, junto con la zona de alteración reportada por el SGM

Dentro de nuestra área de estudio, existe la posibilidad de encontrar algún yacimiento minero de importancia económica, debido a que en algún momento los fluidos se pudieron haber desplazado a lo largo del tiempo por las fallas o fracturas existentes dentro del área y estas a su vez fueron rellenadas por minerales precipitados probablemente de interés económico, tal es el caso de nuestra área de estudio, ya que en donde hay alteración mineral y mayores lineamientos existen concesiones mineras e

incluso algunas minas reportadas por GeolInfoMex (2018), donde se extrae o pretende extraer plata (Ag), Zinc (Zn), plomo (Pb) y cobre (Cu).

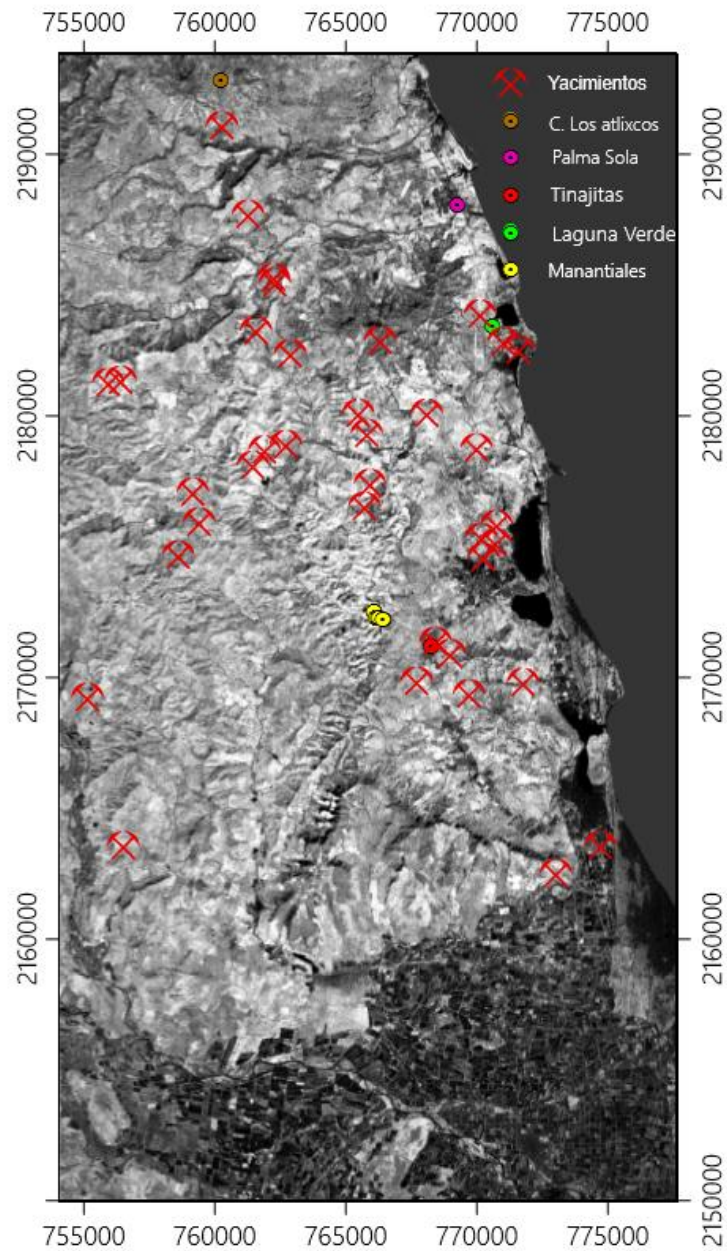


Figura 16. Mapa integrado muestra la convergencia de los hidroxilos y óxidos mostrados en la tabla 4.3.3.3 con un contraste con saturación de 1%, junto con las concesiones mineras reportadas por el GeolInfoMex (2018).

5.2 CONCLUSIONES

El análisis conjunto de la información espectral y espacial que proporciona la Percepción Remota es de gran utilidad en las primeras etapas de la exploración geotérmica y minera, ya que permite identificar y ubicar prospectos en grandes áreas a un costo bajo, enfocando las actividades de exploración a estos sitios.

Cada uno de los realces espectrales aplicados fue evaluado tomando en cuenta sus limitaciones y ventajas, fue así como el objetivo principal de la presente investigación se cumplió con éxito. Cabe mencionar que los análisis que presentaron pequeñas limitaciones contribuyeron en el proceso, marcando el camino para los procesos subsecuentes, generando hipótesis y explicaciones de los datos obtenidos.

Las imágenes generadas a partir del análisis de componentes principales dirigidas constituyen la culminación de los realces espectrales, indicando aquellas zonas con la mayor información espectral en cuanto a la alteración mineral. El realce espacial mostró información sobre los lineamientos presentes cuyas direcciones preferentes son las mismas que en los lineamientos estructurales reportados en campo.

En la presente investigación se identificó una zona de interés (Figura 5.1), que presenta características geológicas y estructurales indicadoras de actividad geotermal. En esta zona hay alteración mineral que coincide con fallas regionales y existen varios contactos litológicos.

Solo se seleccionó una zona de interés, sin embargo, hay más zonas que presentan una alteración mineral muy marcada, pero sin la presencia de lineamiento o incluso zonas donde hay lineamientos presentes, pero no están fuertemente correlacionados con la alteración mineral, se recomienda que dichas zonas se verifiquen en campo.

Se recomienda realizar una verificación en campo de las zonas identificadas en la imagen como favorable para la presencia de mineralización y comparar los resultados obtenidos en el campo tanto para el mapeo de alteración e identificación de estructuras principales con los obtenidos a partir del procesamiento de las imágenes de satélite para comprobar

la existencia de una correlación entre ambos conjuntos de resultados (Ruiz-Armenta & Prol-Ledesma, 1995).

Posteriormente, se sugiere aplicar métodos geofísicos potenciales (gravimetría y magnetometría) en las mismas zonas, con el fin de detectar regionalmente zonas anómalas a profundidad, así como caracterizar mejor las fallas. Una vez visualizadas las zonas anómalas, aplicar métodos electromagnéticos en puntos específicos para ver a mayor profundidad las características del sistema hidrotermal.

6. REFERENCIAS

- Aguirre-Díaz, G., López-Martínez, M., 2001. The Amazcala caldera, Querétaro, central Mexican Volcanic Belt, México. *Geology and geochronology: Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 203-218.
- Bakker, W., Feringa, W., Gieske, A., Gorte, B., Hecker, C., Janssen, L., 2009. *Principles of Remote Sensing: An introductory textbook*. Netherlands: The International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation. 30-42.
- Barbier, E. 2002. Geothermal energy technology and current status: an overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 6(1), 3 – 65.
- Campbell, J. B. 2002. *Introduction to Remote Sensing*. (3rd Ed). The Guilford Press. New York, USA, 718p.
- Campbell, J. & Wynne, R. 2011. *Introduction to Remote Sensing* (5th Ed). New York, USA: The Guilford Press. 667 p
- Canet, C., Hernández-Cruz, B., Jiménez-Franco, A., Pi, T., Peláez, B., Villanueva-Estrada, R., Alfonso, P., González-Partida, E., Salinas, S., 2015. Combining ammonium mapping and short-wave infrared (SWIR) reflectance spectroscopy to constrain a model of hydrothermal alteration for the Acozul geothermal zone, Eastern Mexico. *Geothermics*, vol. 53, 154-165.
- Cantagrel, J., Robin, C., 1979, K-Ar dating on eastern Mexican Volcanic rocks-relations between the andesitic and the alkaline provinces: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 5, 99-114.
- Chavez, P. S. (1975). Atmospheric, Solar, and M.T.F. Corrections for ERTS Digital Imagery. *Proceedings, American Society of Photogrammetry*. Bethesda, MD: American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 69-69a.
- Crosta, A. P., & Moore, J. (1989). Enhancement of Landsat Thematic Mapper Imagery for Residual Soil Mapping in SW Minas Gerais State, Brazil: A Prospecting Case History in Greenstone Belt Terrain. *Proceedings of the Seventh Thematic Conference of Remote Sensing for Exploration Geology*, Calgary, Alberta, Canada, Oct. 2-6, pp. ERIM, 1173-11

- De la Cruz, R. S., Espíndola C. J. M y Medina M. F. 1980. Consideraciones de flujo de calor terrestre. *Ciencia*, 31, 201-231.
- Demant, A., 1978, Características del Eje Neovolcánico Transmexicano y sus problemas de interpretación: *Revista Instituto de Geología*, 2, 172-187.
- Drury, S. A., & Drury, S. A. (2001). *Image interpretation in geology*. 3th ed. Blackwell Science. USA, 136p.
- Ferrari, L., 2004, Slab detachment control on mafic volcanic pulse and mantle heterogeneity in central Mexico: *Geology*, 32(1), 77-80.
- Ferrari, L., Rosas-Elguera, J., 1999, Alkalic (ocean-island basalt type) and calc-alkalic volcanism in the Mexican volcanic belt: A case for plume-related magmatism and propagating rifting at an active margin? *Comment: Geology*, 27.
- Ferrari, L., Vaggelli, G., Petrone, C., Manetti, P., Conticelli, S., 2000b, Late Miocene volcanism and intra-arc tectonics during the early development of the Trans-Mexican Volcanic Belt: *Tectonophysics*, 318, 161-185.
- Ferrari, L., Rosas-Elguera, J., Orozco-Esquivel, M., Carrasco-Núñez, G., Norato-Cortez, T., 2005a, Digital geologic cartography of the TransMexican Volcanic Belt and adjoining areas: *Digital Geosciences*, Universidad Nacional Autónoma de México, <http://satori.geociencias.unam.mx/digital_geosciences>, 1 mapa, 2 p. texto.
- Ferrari, L., Tagami, T., Eguchi, M., Orozco-Esquivel, M. T., Petrone, C., Jacobo-Albarrán, J., López-Martínez, M., 2005b, *Geology, geochronology and tectonic setting of late Cenozoic volcanism along the southwestern Gulf of Mexico: The Eastern Alkaline Province revisited: Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 146, 284-306.
- Flores-Espino, F., Booth, S. & Graves, A. (2017). *Mexico's Geothermal Market Assessment Report*. National Renewable Energy Laboratory, Reporte Técnico NREL/TP-6A20-63722.
- Fraser S. J. 1991. Discrimination and identification of ferric oxides using satellite Thematic Mapper data: A Newman case study: *International Journal of Remote Sensing*. 12, 3, 635-641.

- Fred, G., Watson, R., Lockwood, W., Newman, T., & Anderson, R. (2008). *Development and comparison of Landsat radiometric and snowpack model inversion techniques for estimating geothermal heat flux*. Remote Sensing of Environment, 112(2), 471-481.
- García-Palomo, A., Macías, J., Garduño, V., 2000, Miocene to recent structural evolution of the Nevado de Toluca volcano region, Central Mexico: Tectonophysics, 318, 281-302.
- García-Palomo, A., Macías, J., Tolson, G., Valdez, R., Mora-Chaparro, J., 2002, Volcanic stratigraphy and geological evolution of the Apan region, east-central sector of the Transmexican Volcanic Belt: Geofísica Internacional, 41, 133-150.
- Gómez-Tuena, A., 2002. Control temporal del magmatismo de subducción en la porción oriental de la Faja Volcánica Transmexicana: Caracterización del manto, componentes en subducción cortical. Tesis Doctoral, Instituto de Geología, UNAM.
- Gómez-Tuena, A., LaGatta, A., Langmuir, C., Goldstein, S., OrtegaGutiérrez, F., Carrasco-Núñez, G., 2003, Temporal control of subduction magmatism in the Eastern Trans-Mexican Volcanic Belt: mantle sources, slab contributions and crustal contamination: Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 4(8), doi:10.1029/2003GC000524, 1-33.
- Khorram S., Koch, F. H., Var der Wiele, C. F., Nelson, S. A. C., 2012. Remote Sensing: E.U.A., Springer, Briefs in Space Development, 17-130.
- Kalinowski, A. & Oliver, S. (2004). ASTER Mineral Index Processing Manual. Remote Sensing Applications. Geoscience Australia.
- López-Infanzón, M., 1991, Petrologic study of the volcanic rocks in the Chiconquiaco-Palma Sola area, central Veracruz, Mexico: New Orleans, Tulane University, Tesis de maestría, 139 p.
- Márquez, A., Oyarzún, R., Doblas, M., Verma, S., 1999b, Alkalic (oceanisland basalt type) and calc-alkalic volcanism in the Mexican volcanic belt: A case for plume-related magmatism and propagating rifting at an active margin? Reply: Geology, 27, 1056
- Meyer, C. y Hemley, J.J. (1967). Wall Rock Alteration. En: Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits, Primera Edición, Hubert L. Barnes (ed.), Holt, Rinehart and Winston Inc. Publication, 166-235.

- Moeck, I. (2013). Classification of geothermal plays according to geological habitats. IGA Academic Report, vol. 1, 1-10.
- Negendank, J. F. W., Emmermann, R., Krawczyk, R., Mooser, F., Tobschall, H., Wehrle, D., 1985, Geological and geochemical investigations on the eastern Trans-Mexican Volcanic Belt: *Geofísica Internacional*, 24, 477-575.
- Ochoa-Camarillo, H., 1997, Geología del anticlinorio de Huayacocotla, estado de Hidalgo, en II Convención sobre la Evolución Geológica de México y Recursos Asociados, Libro-guía de las excursiones geológicas: Pachuca, México, Universidad Autónoma de Hidalgo, Instituto de Investigaciones en Ciencias de la Tierra; Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, 1-17.
- Orozco-Esquivel, M. T., 1995, Zur petrologie des vulkangebietes von Palma-Sola, Mexiko. Ein beispiel für den übergang von anorogenem zu orogenem Vulkanismus: Alemania, Universität Karlsruhe, Tesis doctoral, 167 p.
- Orozco-Esquivel, M. T., Ferrari, L., Eguchi, M., Tagami, T., Petrone, C., Jacobo-Albarran, J., 2003, The Eastern Alkaline Province (Mexico) revised: geology, geochronology and geochemistry of Neogene volcanism in Veracruz State, en 99ª Reunión Anual, Geological Society of America, Cordilleran Section, Puerto Vallarta, Jal., Libro de resúmenes, p. 58.
- Pasquaré, G., Garduño, V., Tibaldi, A., Ferrari, M., 1988, Stress pattern evolution in the central sector of the Mexican Volcanic Belt: *Tectonophysics*, 146, 353-364.
- Pasquaré, G., Ferrari, L., Garduño, V., Tibaldi, A., Vezzoli, L., 1991, Geology of the central sector of the Mexican Volcanic Belt, states of Guanajuato and Michoacan: Boulder, CO, Geological Society of America, Map and Chart Series MCH072, 1 mapa con texto, 22 p.
- Pirajno, F., 2006, Hydrothermal Processes and Mineral Systems: Australia, Springer, 1250p.
- Prol-Ledesma R.M., 1988. El calor de la tierra. Fondo de cultura económica. La ciencia desde México 58, 99 pp.
- Prol-Ledesma, R. M., Alcántara, A., & Chávez, M. (1993). Exploración geotérmica utilizando imágenes de satélite en Los Humeros, Puebla, México. *Geofísica Internacional*, 32(1), 99-109.

- Robin, C., 1982, Relations volcanologie-magmatologie-geodynamique: application au passage entre volcanismes alcalin et andesitique dans le sud Mexicain (Axe Trans-mexicain et Province Alcaline Oriental). Clermont-Ferrand, Francia, Annales Scientifiques de l'Université de Clermont-Ferrand II, Tesis doctoral.
- Romo-Jones, J.M., Gutiérrez-Negrín, L.C, Sánchez-Cornejo, C., González A.N. & García-Gutiérrez, A. (2018). *2017 Mexico Country Report. IEA Geothermal, February 2018*, pp. 1-4.
- Ruiz-Armienta J. R. y Prol-Ledesma R. M., 1995, Técnicas de procesamiento de imágenes en la exploración de yacimientos minerales de origen hidrotermal: Servicio de Publicaciones Universidad Complutense, Física de la Tierra, 7, 105-137.
- Sabins, F.F., 1997. Remote Sensing. Principles and Interpretation: W.H. Freeman, Nueva York, NY, 494 p.
- Sabins, F.F., 1999. Remote sensing for mineral exploration: Elsevier, Ore Geology Reviews, 14, 157-183.
- Sobrino, J. (2001). Teledetección. España: Servicio de Publicaciones, Universidad de Valencia. 468 p.
- Suter, M., Carrillo-Martínez, M., López-Martínez, M., Farrar, E., 1995a, The Aljibes half-graben -Active extension at the boundary between the trans-Mexican volcanic belt and the Basin and Range Province, Mexico: Geological Society of America Bulletin, 107(6), 627-641.
- Suter, M., Quintero, O., López, M., Aguirre, G., Ferrar, E., 1995b, The Acambay graben: Active intraarc extension in the Trans-Mexican Volcanic Belt: Tectonics, 14, 1245-1262.
- Suter, M., López-Martínez, M., Quintero-Legorreta, O., Carrillo-Martínez, M., 2001, Quaternary intra-arc extension in the central TransMexican volcanic belt: Geological Society of America Bulletin, 113(6), 693-703.
- Thompson A. J. B., Thompson J. F. H., 1996, Atlas of Alteration. A field and petrographic guide to hydrothermal alteration minerals: Canadá, Geological Association of Canada, Mineral Deposits Division, 120 p.

- Viniegra, F.; 1965. Geología del Macizo de Teziutlán y la cuenca cenozoica de Veracruz. Bol. Asoc. Mex. Geol. Petrol., 17, 7, 101-163.
- Watson, A. (2013). Geothermal engineering: fundamentals and applications. New York, NY: Springer.